INVESTIGACION y CIENCIA

SINCRONIZACION MATERNO-FILIAL EN EL PARTO

ACCIDENTES DE AUTOMOVIL

RECREANDO EL ORIGEN DEL UNIVERSO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

ACTIVIDAD VOLCANICA EN VENUS



MAYO 1999
800 PTA. 4,81 EURO



Mayo de 1999 Número 272

SECCIONES



Portada: Alfred T. Kamajian

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-9	James M. Vreeland, Jr. (*fotografías*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
10	Patricia J. Wynne (*arriba*), François Pathey (*abajo*)
12-13	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro
14	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro (*arriba* y *derecha*), Maribeth Price (*las tres imágenes de abajo*)
15	NASA/Lab. de Propulsión a Chorro
16-17	Mark A. Bullock y David H. Grinspoon (*abajo*), Vicki L. Hansen y Roger J. Phillips (*arriba derecha*)
19	Tom Moore; fuente: Mark A. Bullock y David H. Grinspoon, basado en un diagrama de Carter Emmart
22	Dmitry Krasny
23	Joel Gordon
24-26	Keith Kasnot
28-29	Roberto Osti; fuente: Leif Saul
42-43	Jose Azel
44-45	Laurie Grace (*izquierda*), James Kern (*centro*), Claudio Ciofi (*derecha*)
46	Claudio Ciofi
47	Laurie Grace (*arriba*), Tui de Roy (*abajo*)
48	Ron Lilley (*arriba*), Claudio Ciofi (*centro* y *abajo*)
49	Steve Mirsky
52-53	Datos: Klaus Kinder-Geiger y Ronald Longacre; visualización: Ballard Andrews, Michael McGuigan y Gordon Smith
54	Laboratorio Nacional Brookhaven
55	Bryan Christie (*arriba*), Lab. Nacional Brookhaven (*abajo*)
56	Matt Bloomer (*arriba*), Lab. Nacional Brookhaven (*abajo*)
57	Bryan Christie (*arriba*), Lab. Nacional Brookhaven (*abajo*)
58-63	Bradley R. Smith
64	C. Garbisu, A. Blanco, I. Alkorta, M.J. Llama y J.L. Serra (*izquierda*), R. Lichtl (*derecha*)
65	C. Garbisu, A. Blanco, I. Alkorta, M.J. Llama y J.L. Serra
66-67	D.O. Hall (*izquierda*), A. Vonshak (*centro*) y K.K. Rao (*derecha*)
68-69	C. Garbisu, A. Blanco, I. Alkorta, M.J. Llama y J.L. Serra
70	S. Kannaiyan
71	C. Garbisu, A. Blanco, I. Alkorta, M.J. Llama y J.L. Serra
72-73	Dpto. de Simulación de BMW
74-75	Dpto. de Simulación de BMW (*arriba*), Prueba de Prototipos de BMW (*abajo*)
76-77	Dpto. de Simulación de BMW (*arriba*), Daniels & Daniels
78-79	Cortesía de Elena Bonner
80	Cortesía de German Goncharov
81	Museo y Archivo Vniéf
82	Museo y Archivo Vniéf; cortesía de AIP Emilio Segrè Visual Archives
83	Cortesía de Archivos Sakharov

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Alfonso Susanna: *El regreso del algodón de color*; Manuel Puigcerver: *Cambio climático global en Venus*; José M.ª Valderas Martínez: *El momento del parto* y *Nexos*; Joandomènec Ros: *El dragón de Komodo*; Juan Pedro Campos: *Una gran explosión originaria en pequeño*; Esteban Santiago: *Representación visual de embriones humanos*; Xavier Roqué: *Metamorfosis de Andrei Sakharov*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos.*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek y Glenn Zorpette, *Editors;* Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

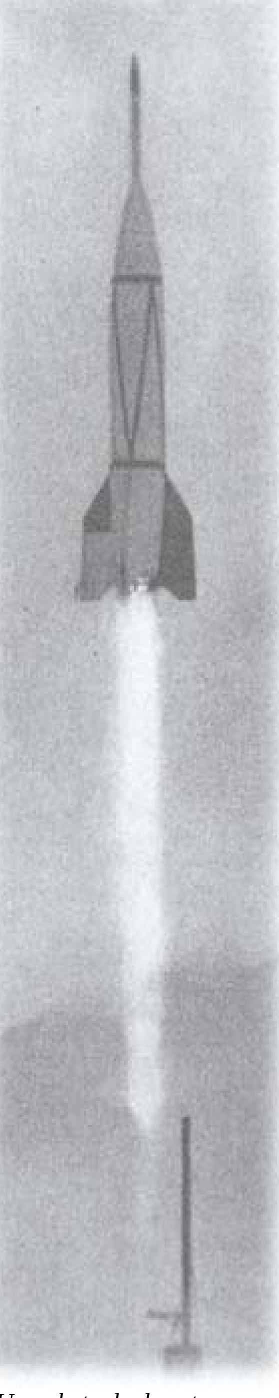
Exito de un cohete. «El 24 de febrero de 1949 el hombre dio su primer paso firme hacia el espacio exterior. Un ex cohete alemán V-2 despegó del polígono de pruebas de White Sands (Nuevo México) portando en su proa un cohete de factura americana, un Wac Corporal, cargado de instrumentos de telemedición. Este comenzó a quemar su propio combustible a unos 32 km altura y se impulsó hasta una cota de 400 km. Aunque no hay acuerdo acerca de los límites de la atmósfera, es justo afirmar que en la cima de su ascenso el Wac Corporal se hallaba en el espacio interplanetario. En ese disparo, hay que poner la mayor esperanza en el uso de fases (ahora llamadas etapas). Si el principio de funcionamiento por fases pudiera ampliarse hasta tres etapas, podría conseguirse un 'cohete satélite' que circunvale la Tierra.»

Naturaleza de los sueños. «Al soñar nos valemos de un lenguaje que se emplea en los documentos culturales más significativos, tales como mitos, cuentos de hadas y literatura, y recientemente en las novelas de Frank Kafka y otros. Ese lenguaje es el único lenguaje universal común a todas las razas e intemporal. Es el mismo en los mitos más antiguos y en los sueños que hoy tenemos todos. Además, a menudo expresa experiencias íntimas, deseos, miedos, opiniones e ideas con una precisión y plenitud mayores de lo que es capaz nuestro lenguaje ordinario. —Erich Fromm»

Grados C. «Los científicos reunidos en París en la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas han votado desechar los tradicionales 'grados centígrados' para las medidas métricas de las temperaturas a favor de la designación 'grados Celsius'. El rebautizo se hace en honor de Andreas Celsius, astrónomo sueco del siglo XVIII.»

...cien años

El futuro del carbón. «En algún momento futuro podría descubrirse un buen sustituto del carbón, pero hay que tener presente la gran baratura de este combustible y la posibilidad de ahorrar aún más en su consumo. Si durante el próximo medio siglo este país (Inglaterra) se salva de dificultades internacionales, tales como una gran guerra, podríamos esperar que nuestras industrias manufactureras disfrutaran de un período de prosperidad. Finalmente, conforme el carbón se encarezca en este país, las operaciones de manufactura que hoy abastecen al mundo serían gradualmente transferidas a naciones donde se produzca el carbón más barato.»



Un cohete de dos etapas se remonta a alturas nunca alcanzadas

Flor letal. «Grande y suntuosa, la flor de la adormidera parece haberse hecho sólo por su hermosa apariencia. Pero contiene un veneno mortal: el opio. Tras usar de éste una persona no tarda en verse esclavizada por un hábito tiránico. El opio se fuma especialmente en China, donde su éxito fue formidable en aquel país de miseria. Benarés, Patna y Malona son los tres grandes centros hindúes desde los que cada mes se exportan mil seiscientas o mil ochocientas cajas de opio de setenta kilos a beneficio de los ingleses.»

Las primeras ayudas a la navegación. «El profesor Marconi ha inventado un instrumento para determinar la posición de un buque en medio de la niebla, siempre que se encuentre dentro del alcance de una estación telegráfica. Consiste en un receptor rotable, que, cuando apunta hacia la estación transmisora, hace sonar un timbre eléctrico, estableciendo así la posición con la precisión de una brújula. El instrumento va a probarse en los vapores del Canal de la Mancha.»

...ciento cincuenta años

Ultimas noticias acerca de la gravedad. «La Ciencia ha desvelado la gran verdad y es que, merced a su influencia que todo lo invade, la gravedad es el agente que mantiene a la Tierra en su órbita. En el universo se mantiene sin fallos el equilibrio de las fuerzas gravitatorias. Si las más remotas de esas gemas luminosas, que parpadean a medianoche en la oscura lejanía de la bóveda celeste, fuesen retiradas de su lugar, la perturbación en enigmas tan delicadamente equilibrados sería sentida en todo el sistema de mundos de la creación.»

Un príncipe científico siamés. «Noticias de Bangkok (Siam) afirman que Su Alteza Real el príncipe T. N. Chau-Fa-Rhromakhun Isaret Rangsan ha construido un pequeño motor de vapor y los siameses pueden ahora presumir de un vapor, todo él construido por artesanos nativos, que navega por el río Menam. Es una embarcación de ocho metros de manga con un motor de dos caballos de vapor. Ese pequeño fenómeno ha realizado varios viajes río arriba y abajo, con su Alteza Real al timón ante los ojos asombrados y admirados de millares de espectadores.»

El regreso del algodón de color

El algodón de natural pigmentado apareció hace unos 5000 años. Para su recuperación hoy se ha recurrido a razas cultivadas por indios de América Central y del Sur

James M. Vreeland, Jr.



Cierta tarde de 1977, pugnaba, una vez más, por continuar mi trabajo en el Museo Nacional de Antropología y Arqueología en Lima, encerrado en un pequeño laboratorio de conservación que compartía con una población variopinta, allí instalada, de pulgas, ratas, una serpiente y un mono. Estaba examinando tejidos precolombinos con un microscopio binocular, con el fin último de encontrar un modo de conservarlos.

No era mi primera estancia en Perú. Acabada mi licenciatura en arqueología, unos años antes, participé en las excavaciones del yacimiento de Chan Chan, en los Andes septentrionales. Ahora, volvía con una modesta beca de la Organización de Estados Americanos para proseguir mis estudios. No podía imaginarme que lo que iba a ver aquel día a través del microscopio cambiaría mi vida.

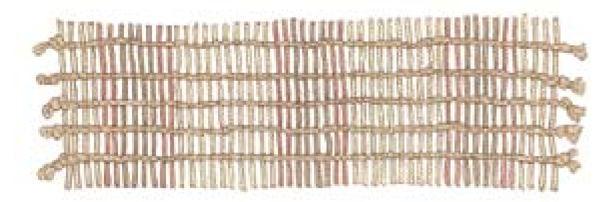
En el interior de las paredes de las fibras de algodón, descubrí unas curiosas masas oscuras que conferían color a la tela, manchas que no parecían ser el resultado de un tinte. Pregunté en distintos departamentos de la universidad limeña si había algún algodón que tuviera pigmentación natural. La respuesta, a menudo burlona, era categóricamente no. Para todos, el algodón era blanco. Según los expertos, la coloración que aparecía en el microscopio tenía que ser resultado de la oxidación o de algún otro cambio de color producido por el envejecimiento de la tela.

No muy convencido, tomé el avión de Trujillo. En Chan Chan había conocido a Víctor Antonio Rodríguez Suy Suy, profesor de antropología de la Universidad Nacional de Trujillo y mochica de origen. Vino a recogerme al aeropuerto. Me aclaró en seguida que el algodón de color natural existía. Fuera del aeropuerto, me señaló tierras colindantes con la calzada; allí, en los campos hundidos, prehispánicos, se distinguían plantas de algodón aferradas al suelo arenoso. ¡Plantas de algodón con fibras rojizas! Extasiado, pasé los siguientes meses viajando por la región, buscando plantas y tejidos con fibras naturales de color crudo, chocolate oscuro y muchos otros matices de pardo, e incluso malva. Fue un trabajo difícil porque los descendientes de los indios mochicas de la costa norte guardaban sus plantas celosamente.

Abandoné mis estudios de arqueología por la etnoarqueología. Durante 20 años busqué toda la información que pude sobre el algodón de color natural en museos, bibliotecas y yacimientos. Hablé con gente muy dispar. De quienes realmente aprendí fue de los indios mochicas. Hace unos 2000 años sus antepasados cultivaron algodones de cientos de matices; ellos seguían conservando sigilosamente algunos cultivares.



1. ALGODON DE COLOR MALVA recuperado a partir de unos pocos enclaves de la costa norte de Perú (*página opuesta*). La planta, esmeradamente cultivada y conservada durante milenios, produce ahora algodón de color natural para fines comerciales. Otros copos muestran algunos colores naturales del algodón creados por selección.



Tejido peruano hecho a la manera de tejido plano

Antes de que se seleccionaran, hace siglos, razas predominantemente blanco crema, las plantas de algodón producían una variedad de colores. Pero la invención de la desmotadora de algodón y los tintes industriales baratos entronizaron el algodón blanco. Las plantas de color, marginadas, sobrevivieron sólo en los bancos de semillas de algunos departamentos de agricultura dispersos por el mundo y en pequeñas comunidades tradicionales en un puñado de lugares, incluidos México, Guatemala y Perú.

Estos algodones pigmentados se han vuelto a poner de moda. Mucha gente está ya familiarizada con ellos y con el algodón blanco de cultivo biológico. Pero son contados los que conocen que la historia del algodón en sus resplandecientes tonos empezó hace unos 5000 años en los Andes. Las plantas de algodón de interés comercial y agronómico, objeto ahora de mejora genética, proceden de cepas precolombinas creadas por los pueblos indígenas de América del Sur.

Prácticas antiguas

Hace cinco milenios, las primeras sociedades agrícolas de América seleccionaron, domesticaron y mejoraron dos especies locales de algodón: *Gossypium hirsutum* y *G. barbadense*. El primero se cultivaba en el norte de América Central; el segundo, el caribe, famoso por tener las fibras mejores y más largas de todos los algodones, se cosechaba en el oeste de Sudamérica.

Abundan las pruebas arqueológicas de la domesticación del algodón en estas regiones. Por mor de brevedad, me ceñiré a unas pocas. La fibra de algodón más antigua encontrada hasta ahora en América Central procede del yacimiento mexicano de Tehuacán, cerca de Oaxaca; se hiló alrededor del año 2300 a.C. En los niveles más antiguos de Huaca Prieta, un asentamiento de la costa norte peruana ocupado entre los años 3100 y 1300 a.C., se han desenterrado fibras de color chocolate, características de *G. barbadense*. Estas fibras color chocolate y otras de color pardo claro pueden verse en muchas de las telas de los tejedores andinos que han sobrevivido gracias a los áridos suelos costeros del norte de Perú. (El aire seco conserva las telas, sensibles a la humedad.)

Según parece se separaron y seleccionaron de intento tales colores por los antiguos pescadores peruanos, que tejían redes con los tonos oscuros porque resultaban menos visibles para los peces, arte y tradición que se conserva hoy en día. A pesar de su uso generalizado desde Oaxaca hasta los Andes, no hay restos de algodón de color en yacimientos prehistóricos al norte de México. Si se llegó a





2. ESTE TAPIZ PERUANO del año 1000 de nuestra era representa la planta del algodón, con sus raíces, hojas, tallos, flores y copos naturalmente pigmentados (*izquierda*). El cuenco tradicional de hilar lo usaban algunas mujeres andinas, probablemente incas, para aguantar el huso mientras hilaban la bola de algodón (*arriba*).

introducir con el comercio o incluso se cultivó lo ignoramos, pues los testimonios han desaparecido o los pigmentos se han descolorido. El algodón "Hopi" (*G. hirsutum* var. *punctatum*) del suroeste de Estados Unidos es en realidad blanco o blanco sucio, aunque es posible que en las muestras conservadas se produjera una degradación química.

Los testimonios posteriores aportan mayor precisión y detalle que los prehistóricos. Evidencian que el algodón pigmentado se usaba como tributo. Así, determinados documentos mexicanos del siglo XVI revelan que el algodón pardo constituía la forma principal de tributación de los habitantes de la llanura a los aztecas. Otros documentos indican que, cuando los españoles cruzaron el desierto peruano en 1531, se maravillaron ante los extensos campos de algodón que crecían en un abanico de colores deslumbrante. Las telas de algodón de colores naturales estaban entre los primeros artículos recogidos como tributo y vendidas o enviadas a la metrópoli. Aquellos tejidos indios escondían un refinamiento técnico muy superior a cuanto se hilara en las ruecas europeas de las postrimerías del siglo XV.

Unas semillas muy viajeras

Conforme el Nuevo Mundo se abría a naturalistas y comerciantes, las plantas de algodón nativas de América sufrieron un trasiego continuo. Hay otras especies de algodón pigmentado nativas de Africa y Asia, incluidas *G. herbaceum* y *G. arboreum*. El algodón también tiene una larga historia en esta parte del mundo: se han descubierto fibras del año 2200 a. C. en el valle del Indo, y han aparecido algunas de hacia el año 2250 a. C. en Nubia. Pero parece que las especies del viejo mundo tienen fibras más cortas, lo que hace que sean mucho más difíciles de hilar y de tejer. En su mayoría terminaron siendo abandonadas en favor de las recién llegadas especies de fibra larga.

El algodón egipcio moderno, por ejemplo, deriva de un progenitor sudamericano (muy probablemente *G. barbadense*), traído verosímilmente por traficantes de esclavos a Africa desde el Nuevo Mundo. Esta raza, descrita hacia 1820, producía un copo largo y fuerte con borra de color pardo dorado. Se la cruzó con plantas locales para tener nuevas razas comerciales: ashmouni, una raza parda; mitafifi, que era pardo más oscuro, tenía un copo más largo y dio origen al algodón americano-egipcio yuma en 1908; y, por último, lo que se llama ahora algodón pima. (Pima es el nombre de una tribu india americana, algunos de cuyos integrantes facilitaron el cultivo de una variedad de *G. barbadense* de fibra extralarga. El algodón pima, desarrollado en Arizona, se obtuvo de una forma egipcia cultivada durante el siglo pasado.)

En China, las especies nativas pigmentadas (las variedades Nankín) tenían fibras cortas como las especies egipcias originales, pero sólo producían algodón de color blanco sucio. Aunque los documentos son confusos en este punto, parece que las referencias del siglo XIX al algodón Nankín podrían aludir a un cultivar introducido del sur de Centroamérica. En cualquier caso, está claro que en algún momento llegaron a China plantas desde el Caribe; es decir, *G. hirsutum*.

Las plantas de algodón coloreado del Mediterráneo oriental arribarían a Estados Unidos durante el período colonial. Se introdujeron cultivares de *G. arboreum*, de *G. hirsutum* y de *G. barbadense*. El algodón de color se hilaba y tejía a mano, en ocasiones también a máquina, en algunos estados del sur. En el corazón del delta del Mississippi, por ejemplo, se ha cultivado algodón pardo dorado desde hace más de doscientos años por un grupo de hilanderos de Acadia. Mas, a pesar de las bolsas dispersas de su cultivo, el algodón coloreado nunca arraigó comercialmente en Estados Unidos. (Sólo Haití y la antigua Unión Soviética produjeron, que se sepa, telas de algodón coloreado a escala industrial. Haití lo hizo por un breve período en los años treinta y los soviéticos cuando empezaron a escasear los tintes en la segunda guerra mundial.)

La extensión por todo el mundo de los diversos cultivares de algodón (llamados algodón de tierras altas) siguió a la invención del telar inglés en 1769 y la desmotadora de algodón en 1794. La revolución industrial estaba en marcha y, con la llegada de los tintes químicos baratos, el destino del algodón coloreado estaba sellado.



Variación al sesgo del modelo de tejido plano

Dominio del blanco

Resultaba más barato usar algodón blanco y teñirlo porque la paleta de colores era ilimitada y no se necesitaban técnicas de cosecha o instalaciones especiales, como ocurría con los algodones pigmentados. Hacia 1900, la mayoría de las razas o cultivares indígenas coloreados que se producían en Africa, Asia y Centro y Sudamérica fueron sustituidos por variedades comerciales blancas.

Durante la segunda guerra mundial, se produjeron por un tiempo limitado algodones verdes y pardos al faltar los tintes. Puesto que el campo soviético estaba cosechando algodón de color, el gobierno norteamericano encargó a un famoso agrónomo, J. O. Ware, que estudiara las plantas soviéticas para determinar su viabilidad comercial en Estados Unidos. Ware y sus colegas llegaron a la conclusión de que las plantas de algodón verde y pardo producían demasiados pocos copos con fibra demasiado corta. El algodón de color quedaba relegado a la oscuridad. Sólo en puntos muy



3. UNA TUMBA PREHISPANICA en el valle de Chancay (Perú) aparece repleta de bolas de algodón de color natural. Los pueblos de esta región costera llenaban, en la antigüedad, el cuerpo del difunto con algodón, que absorbía los fluidos corporales y ayudaba así a la momificación. La árida arena de la región conservó el algodón (extraído del cuerpo cuando la tumba fue saqueada). Cuando los españoles cruzaron el desierto peruano en 1531 quedaron maravillados ante los extensos campos de algodón de color.

4. **UNA FIBRA DE LA BORRA, muy ampliada, revela el retorcimiento espontáneo que facilita la hilanza. Las masas oscuras dan color natural.**

singulares había gente fascinada por sus posibilidades.

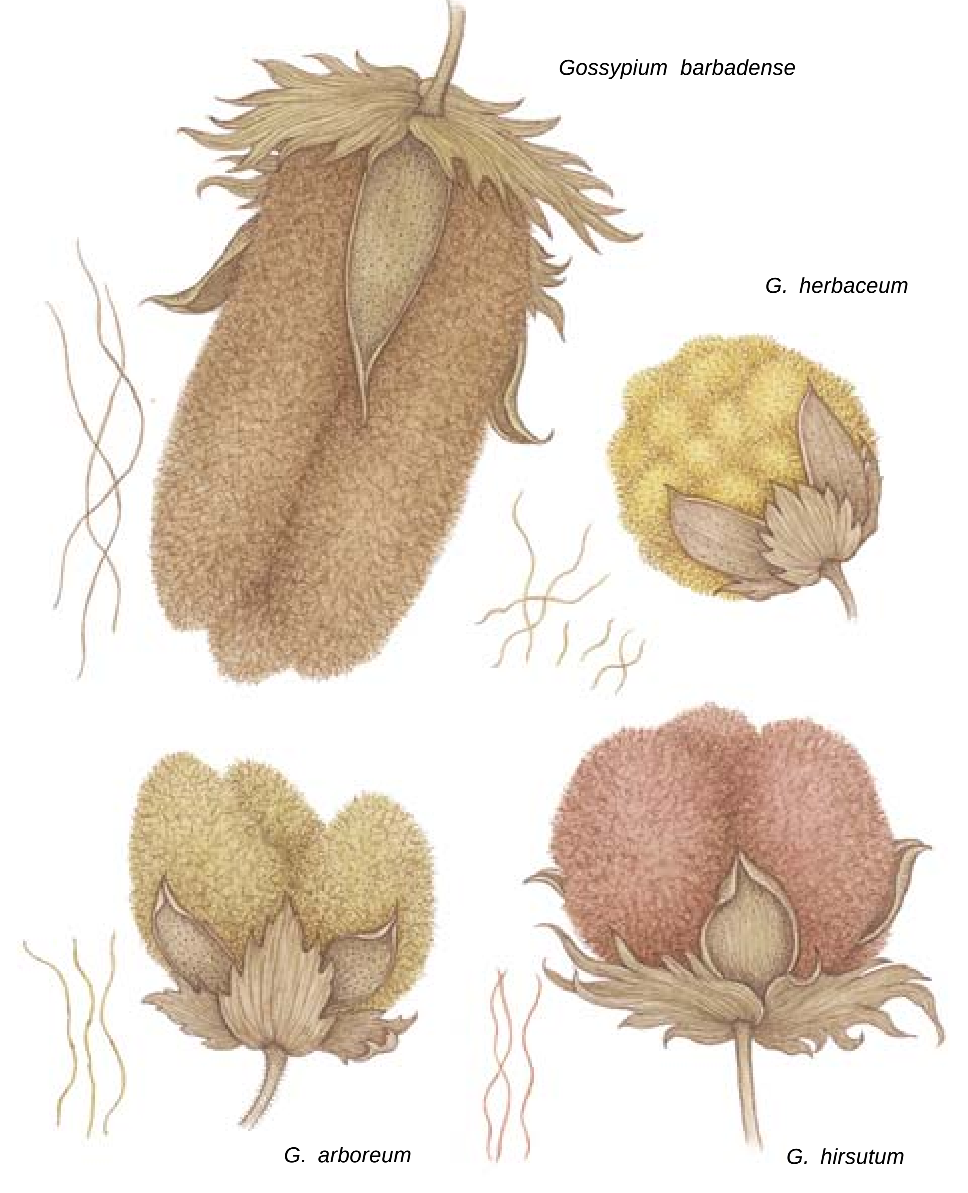
Un mercado nuevo para viejas plantas

Después de desaparecer durante casi un siglo, el algodón de color natural hizo repentino acto de presencia como artículo de moda a principios de los noventa. Las grandes firmas textiles americanas y europeas empezaron a comprar algodón "biológico" (exento de productos químicos). Los cultivadores del algodón usan aproximadamente el 23 % de los insecticidas del mundo y el 10 % de los pesticidas para combatir plagas. Los cultivadores americanos de algodón usan un 35 % del total, lo que hace de ellos los mayores consumidores de pesticidas para el algodón; vienen luego los productores de la India, con un 11 %.

Estos insecticidas y pesticidas, de los que podemos recordar el malathión, aldicarb, metil-paratión, trifuralina, deltametrina y tribufós, están entre los de vida más larga y entre los más destructivos. La trifuralina, por ejemplo, desorganiza los sistemas endocrino y reproductor de los animales. En Estados Unidos, el tribufós es considerado un potencial cancerígeno. Tales sustancias químicas no sólo atacan a los trabajadores que los usan, sino que, además, se filtran en el suelo, alcanzando las aguas freáticas, ríos y arroyos, matando a los peces y contaminando el ganado. El algodón blanco, una vez cosechado, suele blanquearse. Ello implica procedimientos basados en cloro que dan origen a dioxinas. A continuación, el algodón es teñido con un sinnúmero de otros productos, muchos de los cuales incluyen metales pesados que a menudo terminan en las aguas residuales.

La preocupación por los desorganizadores endocrinos y las crecientes tasas de cáncer ha provocado que los consumidores y fabricantes se vuelvan cada vez más a los productores de algodón biológico. Aunque las especificaciones de certificación varían de un país a otro, el sello de aprobación se obtiene si no se han usado pesticidas en sus tierras durante uno a tres años. (Hay expertos, sin embargo, que indican que los residuos de pesticidas tienen una vida bastante larga y en tres años el suelo no queda libre de ellos.) El movimiento está ganando impulso y ahora hay unas 8000 hectáreas en Estados Unidos y en media docena de otros países produciendo algodón biológico, incluido algodones con pigmentación natural que no han sido teñidos con productos tóxicos.

La reaparición del interés por el algodón de color natural ha resultado muy gratificante, para cuantos intervinimos en el redescubrimiento. Cuando empecé mis investigaciones en 1977 (intrigado por las masas oscuras de las fibras) me dijeron que no sólo no había plantas de algodón



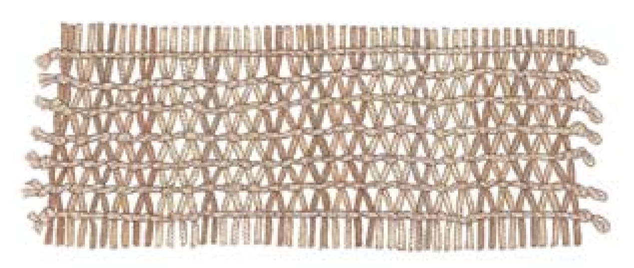
5. CUATRO ESPECIES de algodón y sus longitudes de copo diferentes. Las dos especies de Africa y Asia, *Gossypium arboreum* y *G. herbaceum*, se encuentran en diversas variedades coloreadas, pero ambas tienen copos cortos o medianos. Las dos especies de América Central y del Sur, *G. barbadense* y *G. hirsutum*, desarrollan copos medianos o largos.

de color, sino también que habían desaparecido las antaño tan extendidas y bellas tradiciones de hilar y tejer a mano del norte de Perú. Por eso, en aquel fecundo viaje en que acudí a Rodríguez Suy Suy resultó toda una sorpresa contemplar, primero, algunas plantas y, más tarde, campos enteros de algodón pardo que los campesinos y artesanos indios habían mantenido contra viento y marea.

El descubrimiento de la permanencia de una rica tradición textil cuyo origen se remontaba al 3000 a. C. llamó la atención en Perú. A raíz de ello, creé en 1982, y codirigí, el Proyecto de Algodón Nativo, con apoyo de los ministerios de Trabajo y Turismo. Los que nos implicamos en el proyecto trabajamos para reanimar el cultivo y el uso del algodón coloreado. La recuperación de esta tradición ofrecía a los campesinos un cultivo alternativo, pero requería también el cambio de una política imperante desde hacía un siglo.

Desde 1931, el gobierno peruano había venido promulgando una serie de leyes y decretos encaminados a destruir las formas perennes y pigmentadas de algodón nativo, para así proteger las variedades blancas de interés comercial. Se instauraron medidas de cuarentena en una ancha franja de la costa peruana para erradicar plagas del algodón, eliminando todas las plantas huéspedes alternativas, incluidas razas locales de algodón coloreado, el árbol de kapok de Perú (*Bombax discolor*) y un algodón sin borra (*G. raimondi*). Se aplicaron abundantes plaguicidas y se abandonó la tradición de rotar los cultivos.

Aunque el programa de control de plagas ya había demostrado ser un fracaso caro y mal orientado, se seguía todavía aplicando en los años ochenta, con consecuencias devastadoras. Gran parte de la variabilidad genética que había a principios de siglo estaba irremisiblemente dañada, abandonada por los campesinos indios o eliminada por una legión de nuevos patógenos surgida después de la masiva aplicación de plaguicidas. La propia supervivencia del algodón blanco comercial se hallaba amenazada de muerte. Hasta que, en 1990, se declaró ilegal la erradicación gracias a un nuevo "código ambiental" peruano. Pero los pesticidas siguen incontrolables. En los años noventa, el consumo anual de plaguicidas en Perú alcanzó un máximo: unos ocho kilos de plaguicida por persona y año, aunque los expertos dicen que



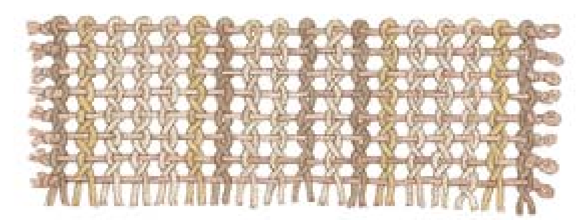
Forma de tejer en zigzag







6. LA COSECHA DEL ALGODON se hace a mano en Perú (*arriba*). Las mujeres clasifican luego el algodón, también a mano, por color y por calidad (*derecha*). Las desmotadoras que se ven aquí fueron diseñadas y patentadas en Inglaterra hace más de un siglo. A pesar de que aún funcionan admirablemente, la mayoría han sido sustituidas hace poco por desmotadoras modernas.



Tejido en celosía del valle de Chancay en Perú

sólo se consigue controlar el uno por ciento de las plagas de insectos.

Poco a poco, hemos conseguido, a lo largo de los últimos diez años, recuperar la diversidad de algodón de color natural. Hoy, el Proyecto de Algodón Nativo conserva 75 razas locales de algodón blanco y pigmentado. Hay unos 15000 campesinos e indios cultivando estos algodones en decenas de campos de Perú y son, con mucho, el principal grupo mundial productor de borra de algodón de color.

La mayoría de ellos usa métodos biológicos, eliminando los insectos mayores a mano (los niños suelen ahogar los escarabajos en un cacharro con agua) y cultivando plantas que repelen a los insectos. Estas técnicas tienen un origen precolombino. Algunos yacimientos arqueológicos del año 1250 de nuestra era demuestran que el algodón se cultivaba en rotación con calabazas. Además, las antiguas muestras de suelo revelan la presencia de polen de otra planta del género *Lippia*. Estos granos proceden de un arbusto invasor, que muchos campesinos creen inútil. Pero años de preguntar a campesinos indígenas me llevaron a un octogenario que identificó las plantas como mastrante. El las cultivaba en hilera, junto a su plantación de algodón nativo, para controlar una plaga llamada mancha del algodón (*Dysdercus peruvianus*). El viejo cortaba periódicamente unos cuantos pies de mastrante, los secaba al sol y, cuando el viento soplaba favorable, los quemaba. El humo penetrante de los arbustos secos inundaba los campos de algodón, expulsando instantáneamente a los insectos responsables de la plaga, que echan a perder el algodón al taladrar las semillas haciendo salir un aceite que mancha la borra.



7. LA ROPA DE ALGODON en colores naturales es producida en Perú por el autor y sus colegas y vendida bajo el nombre comercial Pakucho. Pakucho quiere decir “algodón pardo” en la antigua lengua inca.

El Proyecto de Algodón Nativo creció rápidamente y en 1993 nos vino a buscar una compañía textil de Arequipa que quería poner en el mercado internacional productos de algodón de color natural. Nuestro nombre comercial fue Pakucho (“algodón pardo” en el antiguo idioma inca). Ahora manufacturamos productos y telas de algodón coloreado. El algodón está etiquetado como biológico por Skal, una organización inspectora holandesa. El algodón de color es biológico y libre de productos químicos: es un cultivo muy lucrativo para campesinos que han sido presionados para reconvertir sus tierras a la producción de coca para obtener cocaína.

Hay muchos esfuerzos de recuperación que se parecen al nuestro de Pakucho y el Proyecto de Algodón Nativo. Por ejemplo, en las colinas colombianas de Santander hay un grupo de campesinos, dirigido por estudiantes embarcados en un programa de desarrollo rural, que ha recuperado los métodos nativos de hilar y tejer algodón. En los altiplanos de Guatemala, el museo Ixchel de Ciudad de Guatemala dirige un proyecto de recuperación en comunidades en las que el algodón pardo, o *ixcoco*, se hilaba tradicionalmente hasta que la costumbre casi desapareció. Y en el Oriente boliviano, los indios chiquitanos esperan revivir también el cultivo del algodón natural.

Por supuesto, el futuro del algodón de color parece brillante en muchos sitios. Ha prendido en Estados Unidos y Europa. Y este año, las exportaciones peruanas de algodón de color natural y algodón biológico pasarán de 15 millones de dólares. Es lo justo, porque hace miles de años América fue fuente casi única del algodón de color que hoy conocemos y disfrutamos.

AUTOR

JAMES M. VREELAND, JR., lleva investigando desde 1968 tejidos del Perú antiguo. Descubrió el algodón de color en 1977, cuando preparaba la tesis doctoral bajo la dirección de Richard P. Schaedel, de la Universidad de Texas en Austin. Desde aquel hallazgo, ha trabajado para comprender la pervivencia de un recurso de 5000 años de edad, así como para asegurar su recuperación entre los indios peruanos, los campesinos que cultivan algodón y los artesanos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOCHE: A PERUVIAN COASTAL COMMUNITY. John Gillin. Institute of Social Anthropology, Publicación n.º 3, Smithsonian Institution, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1947.

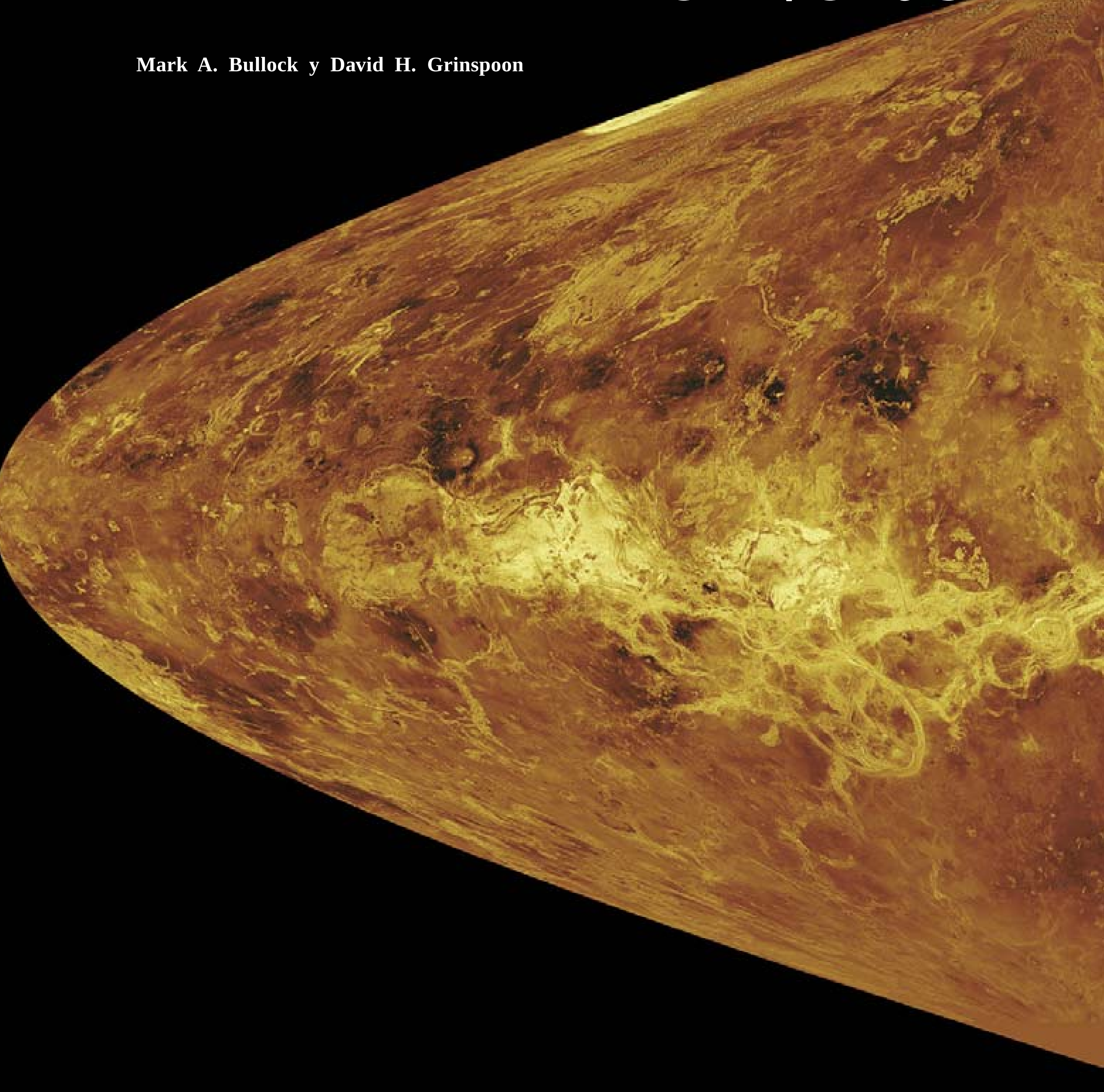
THE NATURAL HISTORY OF THE COTTON TRIBE (*MALVACEAE*, TRIBE *GOSSYPIEAE*). Paul A. Fryxell, Texas A&M Press, 1974.

NATURALLY COLORED AND ORGANICALLY GROWN COTTONS: ANTHROPOLOGICAL AND HISTORICAL PERSPECTIVES. J. M. Vreeland en *Proceedings of the 1993 Beltwide Cotton Conferences*. National Cotton Council of America, 1993.

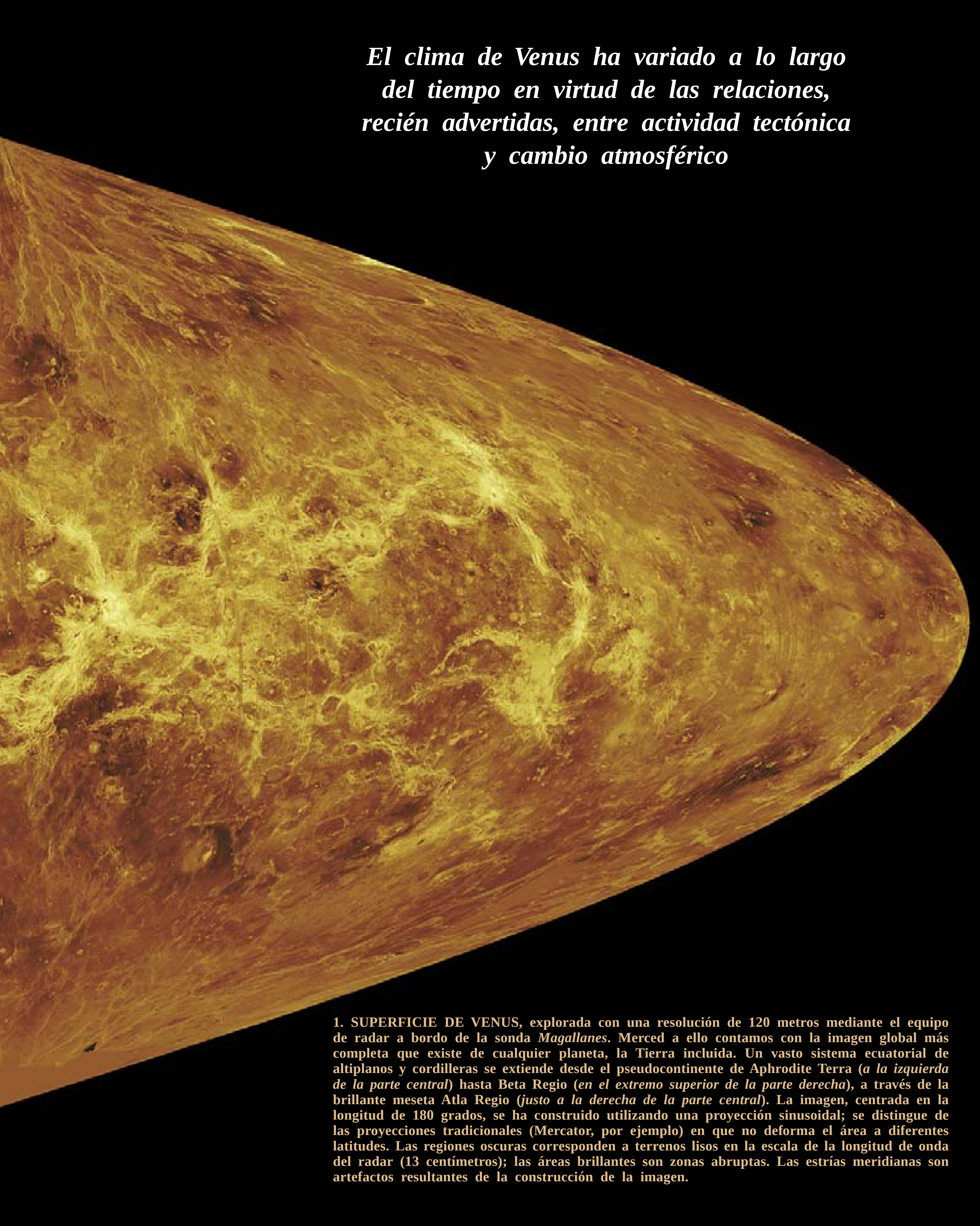
COTTON. J. F. Wendel en *Evolution of Crop Plants*. Dirigido por J. Smartt y N. W. Simmonds. John Wiley & Sons, 1995.

Cambio climático global en Venus

Mark A. Bullock y David H. Grinspoon

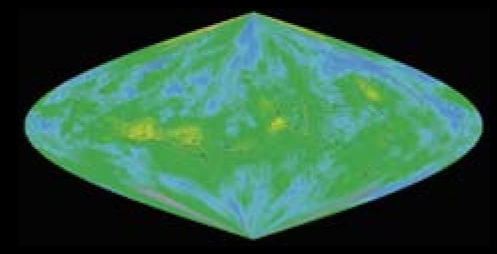


El clima de Venus ha variado a lo largo del tiempo en virtud de las relaciones, recién advertidas, entre actividad tectónica y cambio atmosférico



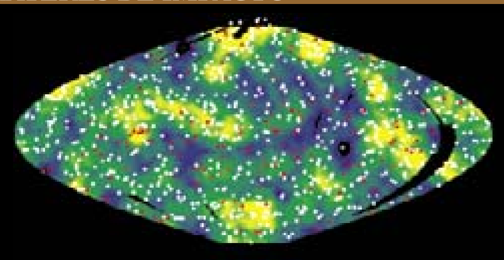
1. SUPERFICIE DE VENUS, explorada con una resolución de 120 metros mediante el equipo de radar a bordo de la sonda *Magallanes*. Merced a ello contamos con la imagen global más completa que existe de cualquier planeta, la Tierra incluida. Un vasto sistema ecuatorial de altiplanos y cordilleras se extiende desde el pseudocontinente de Aphrodite Terra (*a la izquierda de la parte central*) hasta Beta Regio (*en el extremo superior de la parte derecha*), a través de la brillante meseta Atla Regio (*justo a la derecha de la parte central*). La imagen, centrada en la longitud de 180 grados, se ha construido utilizando una proyección sinusoidal; se distingue de las proyecciones tradicionales (Mercator, por ejemplo) en que no deforma el área a diferentes latitudes. Las regiones oscuras corresponden a terrenos lisos en la escala de la longitud de onda del radar (13 centímetros); las áreas brillantes son zonas abruptas. Las estrías meridianas son artefactos resultantes de la construcción de la imagen.

TOPOGRAFIA



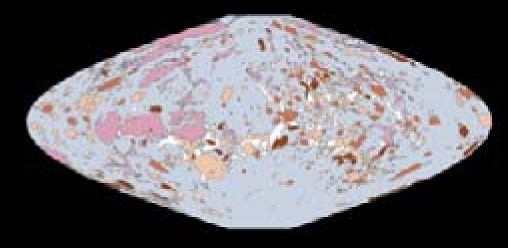
La topografía de Venus abarca una amplia gama de altitudes, unos 13 kilómetros de variación desde los terrenos bajos (*azul*) hasta los altos (*amarillo*). Tres quintas partes de la superficie se encuentran en un margen de 500 metros alrededor de la altura media, determinada por un radio planetario de 6051,9 kilómetros.

CRATERES DE IMPACTO



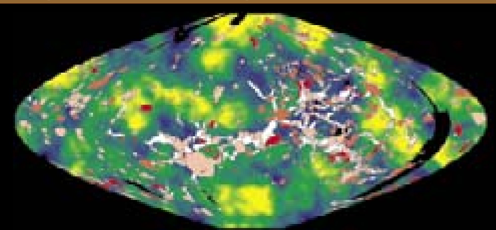
Los cráteres de impacto se encuentran distribuidos al azar sobre toda la superficie de Venus. La mayoría son primitivos (*puntos blancos*); los modificados por lava (*puntos rojos*) o fallas (*triángulos*) se concentran en Aphrodite Terra. Las regiones con baja densidad de cráteres (*fondo azul*) suelen hallarse en tierras altas; en llanuras bajas, las densidades más altas de cráteres (*fondo amarillo*).

CLASES DE TERRENO



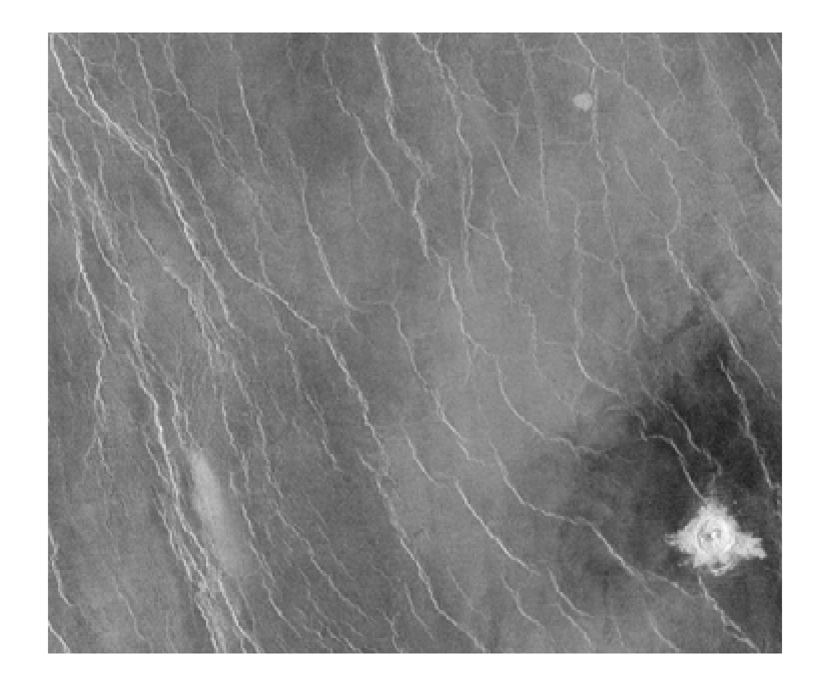
El terreno de Venus está constituido principalmente por llanuras volcánicas (*azul*). Dentro de las llanuras hay regiones deformadas —zonas de enlosado (*rosado*) y fallas (*blanco*)—, accidentes volcánicos —coronas (*melocotón*), inundaciones de lava (*rojo*) y volcanes de diversos tamaños (*anaranjado*)—. Los volcanes no se enlazan en cadenas, señal de que la tectónica de placas no interviene en Venus.

EDADES DEL TERRENO



Este mapa geológico muestra los diferentes suelos y sus edades relativas inferidas a partir de la densidad de cráteres. Los volcanes y las coronas tienden a agruparse alrededor de zonas de falla ecuatorial, que son más jóvenes (*azul*) que el resto de la superficie de Venus. Los enlosados, cordilleras y llanuras son más antiguos (*amarillo*). Sin embargo, la superficie carece en general de las grandes variaciones de edad que apreciamos en la Tierra y Marte.

2. ¿UN RIO EN VENUS? El delta aparece al final de un estrecho canal que recorre 800 kilómetros de las llanuras volcánicas septentrionales. No puede haberlo formado el agua, porque Venus es demasiado cálido y seco. Quizá lo crearan lavas ricas en sales de carbonatos y sulfatos, lo que implicaría que la temperatura media en el pasado era varias decenas de grados superior a la actual. La región que se muestra representa una zona aproximada de unos 40 por 90 kilómetros.



3. LAS CORDILLERAS DE PLEGAMIENTO son el accidente más común en las llanuras volcánicas de Venus. Discurren paralelas, a intervalos regulares; emergieron verosímilmente cuando las llanuras estaban sometidas a tensiones, por culpa, tal vez, de un cambio brusco de la temperatura en superficie. Esta región, que forma parte de las llanuras ecuatoriales conocidas como Rusalka Planitia, mide unos 300 kilómetros de diámetro.

Emergieron a la vez del caldero presolar. La Tierra y Venus presentaban parejo tamaño y composición. Pero siguieron trayectorias evolutivas dispares hasta convertirse en mundos radicalmente diferentes. La temperatura en superficie del planeta gemelar de la Tierra es de unos 460 grados Celsius, suficientes para que las rocas brillen a los ojos de cualquier infortunado representante de la química del carbono que se acercara. Domina un letal efecto invernadero, mantenido por una atmósfera cuyo componente principal es el dióxido de carbono, un aislante eficaz. No hay agua líquida. La presión del aire en superficie centuplica casi la de la Tierra; en muchos aspectos esa envoltura fluida es más océano que atmósfera. Ciñen al planeta nubes de ácido sulfúrico, abastecidas en su química por compuestos gaseosos de azufre más algo de vapor de agua.

Debemos ese cuadro de infierno a una flota de 22 sondas espaciales que han fotografiado, explorado, analizado y pisado Venus en los últimos 37 años. Pero en buena parte de ese período las nubes que ocultan Venus impidieron un reconocimiento completo de la superficie. La idea que la ciencia tenía del planeta permanecía invariable porque se sabía muy poco de los procesos dinámicos, del vulcanismo o la tectónica, que podían haberse dado allí. Las cosas cambiaron con la sonda *Magallanes*. Desde 1990 hasta 1994, la nave cartografió la superficie entera del planeta con alta resolución, observando a través de las nubes con el radar. Nos mostró un planeta que ha experimentado enormes erupciones volcánicas en el pasado y que, casi con seguridad, sigue activo. A la par que la sonda exploraba la historia tectónica de Venus, las simulaciones por ordenador han tratado de reconstruir los últimos mil millones de años de su historia climática. Un vulcanismo intenso ha inducido una transformación global del clima. A diferencia de cualquier otro planeta conocido, excluida la Tierra, Venus presenta un clima complicado y en evolución.

Marte, nuestro otro vecino, ha sufrido también importantes cambios de clima. Su atmósfera actual guarda, sin embargo, información de su ayer tectónico. El interior de Marte es demasiado frío para que perviva un vulcanismo activo; la superficie permanece en una helada quietud. Aunque las variaciones del movimiento orbital y de rotación de Marte pueden inducir cambios climáticos, el vulcanismo no volverá a participar en ellos. En la Tierra y Venus reinan climas gobernados por la interacción dinámica entre los procesos atmosféricos y tectónicos.

Desde la situación de privilegio que ocupamos en el sistema solar, podemos preguntarnos por qué si intervinieron fuerzas semejantes a las que operaron en la Tierra produjeron un efecto tan diferente en Venus. El estudio de este planeta ha dilatado la exposición de la evolución climática más allá del ejemplo singular de la Tierra. Ha aportado nuevas perspectivas para abordar cuestiones apremiantes: ¿Hasta qué punto es único el clima de la Tierra? ¿Cuál es su grado de estabilidad? Con el creciente volumen de residuos, la sociedad industrial se ha lanzado a una aventura incontrolada, de extensión global, sobre el clima terrestre. Si logramos identificar los factores que condicionan la evolución del clima en otros planetas, podremos comprender los mecanismos naturales y antropogénicos que alteran el clima de la Tierra.

Veámoslo con un ejemplo. Mucho antes de que el agujero de ozono se convirtiera en tema común de debate, la investigación se afanaba por desentrañar la exótica fotoquímica de la alta atmósfera de Venus. Se halló que el cloro reducía los niveles de oxígeno libre que había por encima de las nubes del planeta. A la larga, la solución del proceso de Venus arrojó luz sobre un proceso análogo en la Tierra, donde el cloro procedente de fuentes artificiales destruye el ozono estratosférico.

Una de las causas de la variabilidad del clima de la Tierra reside en la naturaleza de su atmósfera, producto del intercambio continuo de gases entre corteza, manto, océanos, casquetes polares y espacio exterior. El motor postrero de los procesos geológicos, la energía geotérmica, impulsa también la evolución de la atmósfera. La energía geotérmica se libera, principalmente, con la desintegración de elementos radiactivos del in-

terior. Pero no resulta tan sencillo explicar la pérdida de calor en los planetas sólidos. Los dos mecanismos principales implicados son el vulcanismo y la tectónica de placas.

Por lo que a la Tierra concierne, su interior cuenta con un sistema de cinta transportadora asociado a la tectónica de placas, cuyo continuo reciclado de gases ha ejercido una fuerza estabilizadora sobre el clima de la Tierra. Los volcanes bombean gases a la atmósfera; la subducción de placas litosféricas los devuelve al interior. Si bien la mayoría de los volcanes están asociados con la actividad de la tectónica de placas, hay estructuras volcánicas notables (las islas Hawai, por ejemplo) que se han erigido en “puntos calientes”, independientes de los contornos de las placas. En el curso de la historia, la formación de inmensas provincias volcánicas —zonas de pertinaz erupción avivada quizá por enormes penachos de magma que flotan en el manto subyacente— podría haber expulsado cantidades ingentes de gases y conducido a períodos de calentamiento global.

¿Qué ocurrió en Venus? Antes de la misión *Magallanes*, la descripción de la estructura y dinámica históricas del planeta fundábase en hipótesis extraídas de comparaciones con la Tierra, que partían de supuestas semejanzas de composición y producción de calor geotérmico. Ahora se está perfilando un cuadro autónomo y global de la historia de la superficie de Venus: la tectónica de placas, si interviene, será a escala limitada; al menos en un pasado reciente, el calor se intercambió mediante la erupción de vastas llanuras de lava basáltica y, más tarde, mediante los volcanes que se formaron encima de ellas. La comprensión de los efectos de los volcanes constituye obligado punto de arranque de cualquier aproximación al clima del planeta.

De la exploración global de la sonda *Magallanes* nos ha llegado un descubrimiento sorprendente, la escasez de cráteres de impacto. Aunque la atmósfera de Venus, muy densa, se baste para proteger el planeta de pequeños objetos incidentes —detiene a la mayoría de los meteoritos inferiores a un kilómetro de diámetro, capaces de abrir cráteres de hasta 15 kilómetros de diámetro—, se echan a faltar grandes cráteres. La observación del número de asteroides y cometas en el sistema solar interno, así como el recuento de cráteres en la Luna, nos dan una pista de la cadencia con que Venus debería de haber acumulado rastros de impactos: en torno a 1,2 cráteres por millón de años. El último recuento de la sonda *Magallanes* sumó sólo 963 cráteres distribuidos al azar por la superficie. Se han borrado los impactos de los primeros 3700 millones de años de la historia del planeta.

MARK A. BULLOCK y DAVID H. GRINSPOON se hallan adscritos a la Universidad de Colorado en Boulder. Bullock, que inició su carrera estudiando la degradación de compuestos orgánicos en Marte, aborda ahora otro tipo de degradación, el de las condiciones benignas de Venus. Grinspoon, investigador de la evolución de la vida y de las atmósferas planetarias, pertenece a un comité que aconseja a la NASA en asuntos de política espacial.

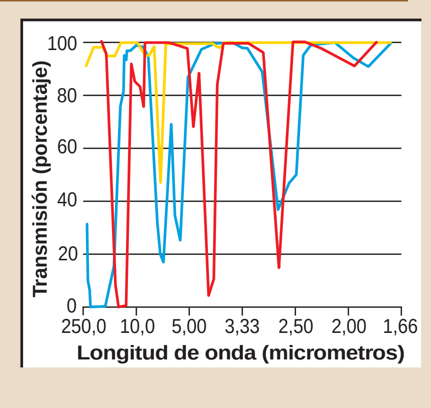
La escasez de cráteres se deja sentir también en la Tierra. La acción del viento y el agua ha terminado por erosionar los cráteres antiguos. Aquí, las condiciones en que se hallan los lugares de impacto varían desde la prístina taza del Cráter del Meteoro en Arizona hasta los contornos apenas discernibles de los impactos precámbricos, enterrados en la corteza continental más antigua. Pero la superficie de Venus registra un calor tal, que impide la existencia de agua líquida; además, los vientos de superficie son flojos. Sin erosión, los procesos que alteran y, a la larga, borran los cráteres de impacto serán la actividad volcánica y la tectónica. Lo que nos empuja a una paradoja. La mayoría de los cráteres de Venus parecen recientes: sólo un seis por ciento tiene cubiertos de lava sus bordes y sólo el 12 por ciento ha sido deformado por plegamientos y fallas de la corteza. ¿Dónde fueron a parar los cráteres antiguos, si la mayoría de los que quedan no han sido alterados? Si han sido tapados por lava, ¿por qué no se ven más cráteres parcialmente cubiertos? ¿Cómo desaparecieron sin que se perdiera su colocación original al azar?

Para algunos, la distribución aleatoria de los cráteres observados y el número restringido de los parcialmente modificados reclaman la existencia de un episodio cataclísmico de proporciones globales que borró de cuajo todos los cráteres hace 800 millones de años. En ese marco, propuesto en 1992 por Gerald G. Schaber, de la Inspección Geológica de los Estados Unidos (USGS), y Robert G. Strom, de la Universidad de Arizona, los impactos han acribillado la nueva superficie formada con posterioridad a esa fecha.

Pero la idea de recubrir un planeta entero con una nueva superficie resulta inaceptable para otros expertos. No cabe pensar en un fenómeno tal en la Tierra. Roger J. Phillips, de la Universidad de Washington, propuso el mismo año un modelo distinto. El recubrimiento superficial en equilibrio, así se denomina, admite que existen procesos geológicos persistentes que borran los cráteres en pequeñas extensiones de terreno de forma continua, preservando una distribución global que parece aleatoria. Contra esa hipótesis labora la magnitud,

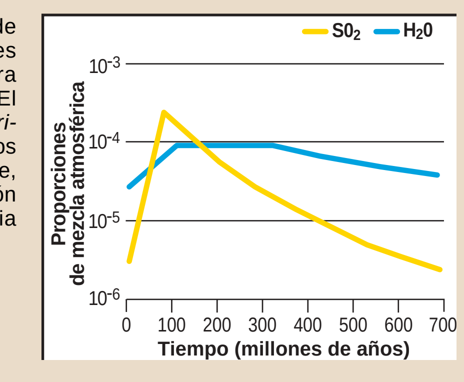
EFECTO DE INVERNADERO

Los gases de invernadero permiten que la luz solar alcance la superficie de Venus, pero bloquean la radiación infrarroja emitida. El dióxido de carbono (*rojo*), agua (*azul*) y dióxido de azufre (*amarillo*) absorben cada uno en una banda particular de la longitud de onda. Si no fuera por esos gases, la radiación solar y la infrarroja se equilibrarían a una temperatura de superficie de unos –20 grados Celsius.



CONCENTRACIONES DE GASES

El agua y el dióxido de azufre que los volcanes arrojan a la atmósfera son luego eliminados. El dióxido de azufre (*amarillo*) reacciona bien con los carbonatos de superficie, mientras que la radiación solar ultravioleta disocia el agua (*azul*).



enorme, de algunos accidentes geológicos de Venus; la actividad geológica no borraría, pues, los cráteres de forma limpia y aleatoria en todas partes.

Estos dos puntos de vista maduraron hasta establecer un debate científico a medida que se afinaba el análisis de los datos de *Magallanes*. La verdad podría hallarse a medio camino. De hecho, la teoría predominante acerca de los últimos mil millones de años de la historia geológica de Venus incorpora elementos de uno y otro modelo: un vulcanismo generalizado borró la mayoría de los cráteres de impacto y creó extensas planicies volcánicas hace 800 millones de años, a lo que siguió un nivel moderado de incesante actividad volcánica hasta hoy.

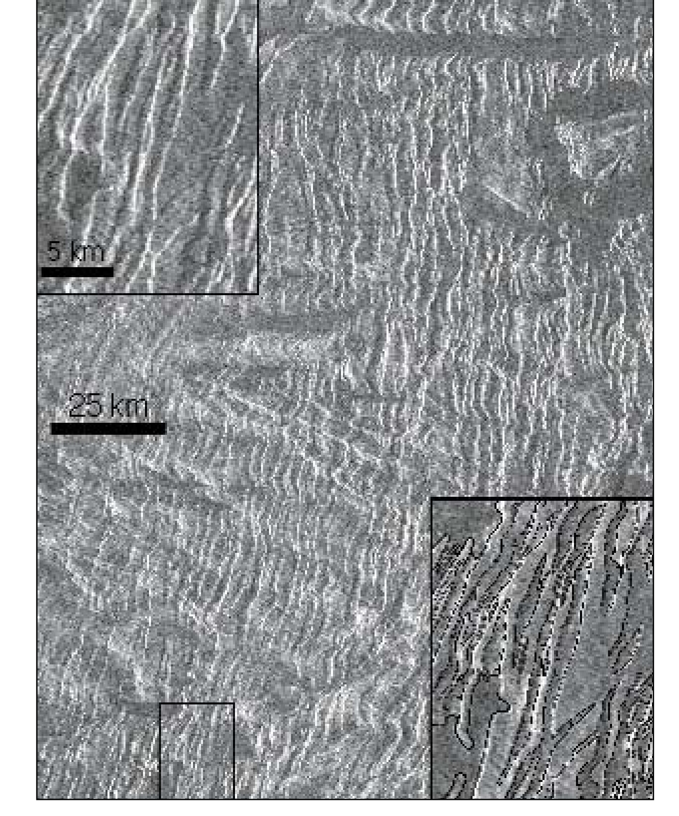
El vulcanismo ha sido, sin duda, una fuerza determinante de la creación de la superficie de Venus. Pese a ello, la interpretación de ciertos rasgos enigmáticos no había podido integrarse, hasta hace poco, en un cuadro coherente de la evolución del planeta. Entre esas notas, la posibilidad de que el clima del planeta haya sufrido una transformación radical.

Distinguimos, en primer lugar, diversas estructuras lineales, curiosas, que recuerdan a los suelos labrados por las aguas. Con una longitud de hasta 7000 kilómetros, son viva estampa de nuestros ríos sinuosos y llanuras de inundación. Muchas de esas estructuras terminan en canales de eyección parecidos a deltas. La extrema sequedad del entorno hace improbable que las aguas excavasen esos accidentes. ¿A qué se deben, pues? Tal vez el carbonato cálcico, el sulfato cálcico y otras sales sean los culpables. La superficie, que se mantiene en equilibrio con una pesada atmósfera de dióxido de carbono y gases sulfúricos, debe de estar repleta de esas substancias. De hecho, los módulos de aterrizaje soviéticos *Venera* hallaron que las rocas de superficie contienen de un 7 a un 10 por ciento de minerales de calcio (casi con certeza carbonatos) y de un 1 a un 5 por ciento sulfatos.

Las lavas cargadas con esas sales fundieron a temperaturas entre unas pocas decenas hasta unas centenas de grados más altas que la temperatura actual de la superficie de Venus. El grupo de la USGS encabezado por Jeffrey S. Kargel conjeturó que entre unos centenares de metros y varios kilómetros bajo la superficie podría haber, a la manera de nuestros acuíferos subterráneos, vastos depósitos de un magma (rico en sales) de carbonatita fundida. En el pasado, una temperatura superficial algo más elevada podría haber derramado lavas fluidas ricas en sales sobre la superficie, cuya estabilidad explicaría la acción forjadora de los accidentes que vemos en la actualidad.

En segundo lugar, los misteriosos enlosados —los terrenos más antiguos de Venus— sugieren también la existencia de altas temperaturas en el pasado. Estos paisajes, surcados de arrugas, se encuentran en mesetas parecidas a continentes que se elevan varios kilómetros por encima de las llanuras de lava. A tenor de los análisis realizados por Phillips y Vicki L. Hansen, de la Universidad Metodista del Sur, las mesetas se formarían por dilatación de la litosfera (el exoesqueleto rígido del planeta, formado por la corteza y el manto superior). El proceso sería, en una imagen frecuente, similar al estiramiento de un bombón de caramelo recubierto de chocolate, cuyo interior es pegajoso, y delgada y quebradiza la corteza. En la actualidad, la parte más externa y frágil de la corteza es demasiado gruesa para comportarse de esa manera. En la época de formación de los enlosados esta capa tuvo que ser mucho más delgada, lo que implica que la superficie estaba mucho más caliente.

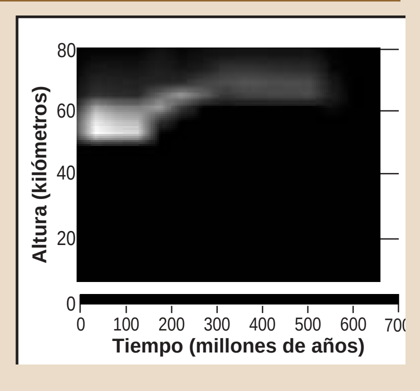
Grietas y pliegues surcan el planeta. Algunas de esas configuraciones, por lo menos las cordilleras arru-



4. LOS TERRENOS EN FORMA DE CINTAS están formados por vaguadas poco profundas (400 metros) con laderas abruptas y fondo plano. Estos accidentes pudieron resultar de la fractura de una capa de roca delgada y frágil que se hallaría encima de un substrato débil y dúctil. La imagen muestra una ampliación de la región del interior del rectángulo sombreado, con las vaguadas marcadas en el ángulo inferior derecho.

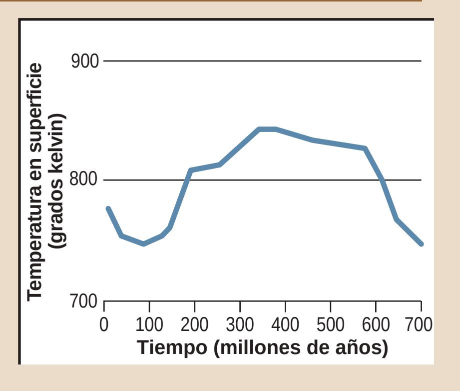
COBERTURA DE NUBES

Las nubes de ácido sulfúrico varían en espesor después de una serie global de erupciones volcánicas. En primer lugar, las nubes ganan espesor a medida que el agua y el ácido sulfúrico salen arrojados al aire. Después lo pierden conforme decrece la concentración de esos gases. Transcurridos unos 400 millones de años del comienzo del vulcanismo, las nubes ácidas son sustituidas por nubes de agua delgadas y altas.



TEMPERATURA

La temperatura de superficie depende de la importancia relativa de las nubes y del efecto invernadero. Inicialmente, el vulcanismo produce nubes potentes que enfrían la superficie. Ahora bien, puesto que el agua desaparece de la atmósfera del planeta más despacio que el dióxido de azufre, se produce a continuación un efecto de invernadero que calienta la superficie.



¿Por qué es Venus un infierno?

Las clamorosas diferencias de clima que distinguen ahora la Tierra de Venus guardan relación con la historia del agua en ambos mundos. Los océanos y la atmósfera de la Tierra contienen hoy 100.000 veces más agua que la atmósfera de Venus. En nuestro planeta, el agua líquida ejerce funciones intermediarias en reacciones del dióxido de carbono con las rocas superficiales, gracias a lo cual el dióxido de carbono del aire puede formar minerales. Además, es probable que el agua escondida en el manto subyacente sea responsable de la capa de baja viscosidad, o astenosfera, sobre la cual se deslizan las placas litosféricas de la Tierra. La formación de minerales carbonatados y su posterior descenso con las placas tectónicas evitan que el dióxido de carbono se acumule hasta los niveles hallados en Venus.

No obstante, los modelos de formación de los planetas predicen que los dos mundos deberían de haber disfrutado de aproximadamente la misma cantidad de agua, proporcionada por el impacto de cuerpos helados procedentes del sistema solar externo. Cuando la misión *Pioneer* se puso en órbita en 1978, se midió la relación de deuterio a hidrógeno ordinario en el agua de las nubes de Venus. Para sorpresa de todos, la presencia de deuterio era 150 veces mayor allí que en la Tierra. Se supone que, en el pasado, Venus había tenido mucha más agua y la perdió. Lo mismo el hidrógeno que el deuterio, químicamente equivalentes, se hallaban integrados en moléculas de agua. Cuando el vapor de agua se difundió hasta la alta atmósfera, la radiación solar ultravioleta lo disoció en oxígeno e hidrógeno o deuterio. Puesto que el hidrógeno, más ligero, escapa al espacio con mayor facilidad que el deuterio, aumentó la cantidad relativa de deuterio.

¿Por qué tuvo lugar este proceso en Venus y no en la Tierra? En 1969, Andrew P. Ingersoll, del Instituto de Tecnología de California, mostró que, si en un planeta se disponía de suficiente energía solar, se evaporaría en seguida toda el agua de superficie. El vapor de agua liberado calentaría más la atmósfera y provocaría un efecto invernadero descontrolado. El proceso transportaría el grueso del agua del planeta a la atmósfera superior, donde, disociada, acabaría por perderse. Más tarde, James F. Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y sus colaboradores desarrollaron un modelo pormenorizado de ese efecto. Estimaron que la irradiancia solar crítica necesaria para iniciar un efecto de invernadero descontrolado era alrededor de un 40 por ciento mayor que la que se recibe en la Tierra. Este valor corresponde, más o menos, a la irradiancia solar que se recibiría en la órbita de Venus poco después de su formación, cuando la luz del Sol era un 30 por ciento más débil. En los primeros 30 millones de años de su existencia Venus pudo dejar escapar una cantidad de agua equivalente a un océano terrestre.

En el modelo queda un cabo suelto. Si Venus tenía en sus comienzos una densa atmósfera de dióxido de carbono como la actual, habría retenido una fracción notable de agua. El volumen de agua que se pierde depende de cuánta puede ascender a altura suficiente para disociarse. Ahora bien, el ascenso es menor en un planeta con atmósfera densa. Además, las nubes que se formaran durante el proceso habrían reflejado la radiación solar hacia el espacio y detenido el efecto invernadero descontrolado.

Así las cosas, el grupo de Kasting consideró la posibilidad de una irradiancia solar ligeramente por debajo del valor crítico. En ese cuadro, Venus tendría océanos calientes y una estratosfera húmeda. Los mares mantendrían bajos los niveles de dióxido de carbono al disolver el gas y facilitar la formación de carbonatos. Con la lubricación proporcionada por la presencia de agua en la astenosfera, podría haber entrado en funcionamiento la tectónica de placas. En resumen, Venus habría poseído mecanismos de estabilización del clima similares a los que operan ahora en la Tierra. Pero estos mecanismos no eran infalibles. La menor densidad de la atmósfera no podía impedir que el agua se difundiera hasta grandes alturas. En los subsiguientes 600 millones de años, desapareció una cantidad de agua equivalente a un océano terrestre. La tectónica de placas dejó de actuar; sólo el vulcanismo y la conducción del calor constituían los únicos mecanismos de enfriamiento del interior. Tiempo después, el dióxido de carbono se acumuló en el aire.

Esta hipótesis del efecto invernadero húmedo ilustra la relación entre los cambios solar, climático y tectónico. Los procesos atmosféricos y superficiales se refuerzan mutuamente y preservan el *statu quo*; pero pueden también colaborar en su propia destrucción. Si la teoría es correcta, Venus tuvo océanos en el pasado y quizás incluso vida, aunque sea imposible saberlo con seguridad.

—*M.A.B.* y *D.H.G.*

gadas, pueden guardar relación con variaciones temporales del clima. Junto con Sean C. Solomon, de la Institución Carnegie de Washington, hemos razonado que las llanuras conservan episodios de deformación globalmente coherentes que ocurrieron quizá durante cortos períodos de historia tectónica. Según parece, la litosfera entera sufrió un proceso de dilatación o compresión general. Pero semejante proceso global requiere un mecanismo interno difícil de imaginar en un planeta sólido. Mas ¿qué decir de una variación del clima en su conjunto? Solomon calculó que las fluctuaciones de la temperatura en superficie de unos 100 grados Celsius habrían inducido en la litosfera tensiones de unos 1000 bares, del mismo orden que las que originan cinturones montañosos en la Tierra y suficientes para deformar la superficie de Venus.

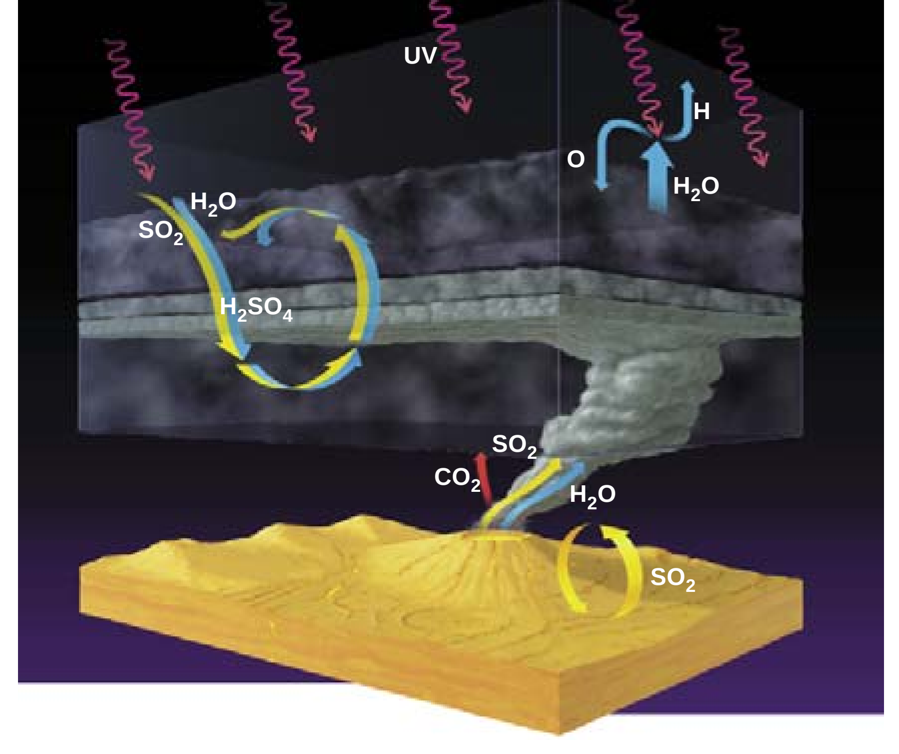
Por las fechas en que el debate sobre la historia tectónica reciente de Venus se exacerbaba, nos encontrábamos perfilando un modelo de su atmósfera. La teoría muestra que las extrañas y hostiles condiciones ambientales se mantienen debido a propiedades complementarias de los constituyentes de la atmósfera. El vapor de agua, incluso en cantidades traza, absorbe radiación infrarroja en longitudes de onda en que no lo hace

el dióxido de carbono. Al propio tiempo, el dióxido de azufre y otros gases bloquean las demás longitudes de onda. Considerados en su conjunto, esos gases de invernadero determinan que la atmósfera de Venus sea parcialmente transparente a la radiación solar incidente, pero casi completamente opaca a la radiación infrarroja emitida. En consecuencia, la temperatura de superficie (medida en grados kelvin) triplica la que el planeta tendría sin atmósfera. En comparación, el efecto de invernadero terrestre eleva hoy la temperatura de superficie en sólo un 15 por ciento.

Si fue cierto que los volcanes recubrieron la superficie de Venus hace 800 millones de años, debieron de vomitar también una cantidad ingente de gases de invernadero a la atmósfera en un intervalo de tiempo bastante corto. Entra dentro de lo razonable admitir que las erupciones produjeron lava suficiente para recubrir el planeta con una capa de uno a 10 kilómetros de espesor. En esa hipótesis, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera apenas habría cambiado; lo contenía ya en abundancia. Pero la concentración de vapor de agua y dióxido de azufre se habrían decuplicado y centuplicado, respectivamente. Fascinados por las posibles implicaciones, elaboramos un modelo del clima del planeta entendido como un sistema de procesos conectados, que incluyen la liberación de gases por los volcanes, la formación de nubes, la pérdida de hidrógeno en las capas superiores de la atmósfera y la reacción de los gases atmosféricos con los minerales de la superficie.

Entre esos procesos se desarrolla una interacción sutil. Aunque el dióxido de carbono, el vapor de agua y el dióxido de azufre calientan la superficie, los dos últimos ejercen también un efecto compensador: la formación de nubes. Con una concentración mayor de vapor de agua y dióxido de azufre no sólo se reforzaría el efecto invernadero, sino que aumentaría también el espesor de las nubes, que reflejan la luz del Sol hacia el espacio y, por consiguiente, enfrían el planeta. Ante tales efectos contrapuestos, no podemos decidir qué resultó de la inyección de los dos gases para el clima global.

De acuerdo con nuestras simulaciones, predominó en un comienzo el efecto de las nubes; la superficie se enfrió unos 100 grados Celsius. Luego, las nubes fueron poco a poco disipándose. El agua se difundió hasta las capas superiores de la atmósfera, donde la disoció la radiación solar ultravioleta. Y así se escapó el hidrógeno al espacio; lo hizo de forma paulatina. La atmósfera perdió la mitad de este gas en los primeros 200 millones de años. Mientras tanto, el dióxido de azufre reaccionaba con las rocas calizas. Como han demostrado experimentos de laboratorio llevados a cabo por Bruce Fegley, Jr., de la Universidad de Washington, y sus colaboradores, los carbonatos absorben el dióxido de azufre de la atmósfera de Venus mucho más deprisa que lo que tarda el agua en perderse en el espacio.



5. LA ATMOSFERA DE VENUS, cubierta de nubes de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sufre temperaturas de horno y presiones de océano. Venus, y ésa es la razón del infierno, carece de los ciclos que estabilizan las condiciones en la Tierra. Sus procesos atmosféricos proceden en una sola dirección. El dióxido de carbono (CO_2), una vez inyectado por los volcanes, permanece en la atmósfera; el agua (H_2O), tras ser destruida por la radiación ultravioleta, se pierde para siempre en las profundidades del espacio; el dióxido de azufre (SO_2), en cuanto queda atrapado en los minerales, se acumula en la superficie (aunque se recicla una pequeña cantidad).

Conforme menguaban las nubes, llegaba al suelo más energía solar, calentándolo. Tras unos 200 millones de años, las temperaturas subieron lo suficiente para empezar a evaporar las nubes desde abajo. Se produjo una realimentación positiva: cuanto más se degradaban las nubes, menos radiación solar volvía reflejada al espacio; a mayor calentamiento de la superficie, mayor evaporación de las nubes desde abajo, y así sucesivamente. La espesa cobertura de nubes desapareció muy presto. Transcurridos unos 400 millones de años, apenas quedaba una tenue capa nubosa a gran altura, compuesta principalmente por vapor de agua. La temperatura de superficie superaba en unos 100 grados centígrados los valores actuales, porque la abundancia de vapor de agua atmosférico era todavía bastante alta y porque las nubes, adelgazadas, contribuían al efecto de invernadero sin reflejar mucha radiación solar. Pasados unos 600 millones de años desde el comienzo del vulcanismo global, y en ausencia de actividad volcánica ulterior, las nubes desaparecieron.

Puesto que se van perdiendo sin cesar el dióxido de azufre y el vapor de agua, para persistir las nubes necesitan que no se apague la actividad volcánica. A tenor de nuestros cálculos, para dar vida a las espesas nubes que observamos hoy, tuvo que haber episodios de vulcanismo activo en los últimos 30 millones de años. Los procesos internos que generan vulcanismo en la superficie operan durante períodos superiores a las decenas de millones de años; cabe, pues, la posibilidad de que los volcanes sigan vivos. Ello concuerda con la observación de variaciones en la concentración de dióxido de azufre

en Venus. Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado en Boulder, observó en 1984 que la concentración de dióxido de azufre en la parte superior de las nubes había disminuido en más de una décima parte durante los primeros cinco años de la misión *Pioneer Venus*, de 1978 a 1983. Las variaciones de este gas y de las partículas nubosas asociadas, concluyó, se debían al vulcanismo. Las fluctuaciones de la temperatura en superficie, estimuladas por el vulcanismo, constituyen otra explicación natural de muchos rasgos desconcertantes observados por la sonda *Magallanes*.

Por fortuna, el clima de la Tierra no ha padecido condiciones tan extremas en su pasado geológico reciente. Aunque no exenta de vulcanismo, su atmósfera rica en oxígeno —aportado por los organismos y agua abundante— elimina sin problemas los gases sulfurosos. Por tanto, las nubes de agua son un factor clave para el equilibrio térmico del planeta. La cantidad de vapor de agua de que disponen viene determinada por la evaporación de los océanos, que a su vez depende de la temperatura superficial. Un efecto invernadero ligeramente incrementado se traduce en mayor cantidad de agua en la atmósfera y da por resultado mayor cobertura nubosa. La mayor reflectividad reduce la energía solar incidente y, con ello, la temperatura. Esta realimentación negativa actúa como un termostato; modera la temperatura de superficie durante cortos intervalos de tiempo (de días a años). Una realimentación similar, el ciclo del carbonato-silicato, estabiliza también la concentración de dióxido de carbono atmosférico. Gobernado por el lento proceso de la tectónica de placas, este mecanismo opera en escalas temporales del orden del medio millón de años.

Ciclos tan interesantes, que se entrelazan con los ciclos del agua y de la vida, han ahorrado al clima de la Tierra las oscilaciones extremas que ha soportado su planeta hermano. Pero las influencias antropogénicas actúan en escalas de tiempo intermedias. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre ha aumentado en una cuarta parte desde 1860. Se admite que estamos asistiendo a un calentamiento global, aunque se debata la cuantía debida a combustión de carburantes fósiles y la fracción asignable a variaciones naturales. No se sabe si existe una cantidad crítica de dióxido de carbono que rompa los ciclos de regulación climática de la Tierra. Pero una cosa es cierta: los climas de los planetas semejantes a la Tierra pueden experimentar bruscas transiciones en razón de las interacciones entre procesos a escala planetaria. A la larga, el destino de la Tierra está decidido. Conforme el Sol envejece, brilla más. De aquí a mil millones de años, los océanos iniciarán un proceso de evaporación acelerada y el clima sucumbirá a un efecto de invernadero irrefrenable. La Tierra y Venus, que comenzaron siendo gemelos casi idénticos para luego seguir caminos distintos, acabarán quizá por retomar su parecido.

Nos agrada recordar el panorama rosáceo de la ciencia y la técnica de nuestra infancia, en los años sesenta. La capacidad de la Tierra para abastecernos de materiales y absorber basura parecía ilimitada. La perspectiva ha cambiado de raíz. La ciencia concibe ahora la Tierra como hogar generoso pero finito. Los desechos producidos por la sociedad industrial pueden modificar el clima del planeta. El estudio de Venus, por muy ajeno que pueda parecer, es esencial para la búsqueda de principios generales de la variación climática y, por tanto, para la comprensión de la fragilidad o robustez del mundo que habitamos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE STABILITY OF CLIMATE ON VENUS. Mark A. Bullock y David H. Grinspoon en *Journal of Geophysical Research*, volumen 10, n.º E3, páginas 7521-7530; marzo 1996.

VENUS II: GEOLOGY, GEOPHYSICS, ATMOSPHERE AND SOLAR ENVIRONMENT. Dirigido por Stephen W. Bougher, Donald M. Hunten y Roger J. Phillips. University of Arizona Press, 1997.

VENUS REVEALED: A NEW LOOK BELOW THE CLOUDS OF OUR MISTERIOUS TWIN PLANET. David H. Grinspoon. Perseus Books, 1997.

THE NEW SOLAR SYSTEM. Cuarta edición. Dirigido por J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen y Andrew Chaikin. Cambridge University Press, 1998.

Existe un atlas interactivo de Venus, disponible en la página Web www.ess.ucla.edu/hypermap/Vmap/top.html.

El momento del parto

Se ha descubierto que una hormona de la placenta determina el momento del parto. Con ello se abre el camino para la creación de métodos preventivos de partos prematuros

Roger Smith

El embarazo dura en los humanos unas 40 semanas. A los nacidos antes de la trigésimo-octava semana de gestación se les llama prematuros. Treinta años llevan los médicos acumulando experiencia en salvar a éstos, que, sin embargo, acostumbran padecer alguna que otra complicación, desde dificultades respiratorias hasta parálisis cerebral pasando por problemas de desarrollo intelectual.

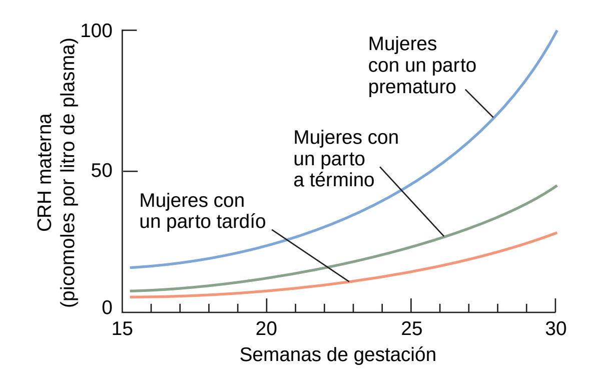
De un 6 a un 8 por ciento de los recién nacidos llegan antes de plazo. La mitad de los casos se atribuyen a partos prematuros espontáneos. La prevención de estos partos evitaría la muerte o la minusvalía permanente de muchos niños.

¿Por qué ha fracasado siempre la prevención? Hasta hace unos años, se sabía muy poco sobre los mecanismos biológicos que regulan el desencadenamiento del parto y aún menos sobre las posibilidades de evitar que actuaran de forma inapropiada. Pero la situación ha cambiado gracias a las investigaciones desarrolladas en diversos centros, entre ellos el del autor en la Universidad de New Castle. Comienzan a aflorar nuevas ideas para evitar el parto prematuro y retrasar el nacimiento hasta que el feto esté maduro para abandonar el seno materno.

Se ha descifrado un mecanismo que determina algo más que el momento exacto del nacimiento. Regula los cambios operados en el cuello uterino y otros durante las dos últimas semanas del embarazo y culminan en el alumbramiento. (A veces se denomina parturición a esos procesos relacionados con la transformación de útero y cérvix.)

El progreso en el desciframiento del control de tales procesos que desembocan en el parto ha arrojado luz sobre la naturaleza de los mismos. Desde hacía tiempo se sabía que las células de la musculatura lisa del útero permanecen desconectadas durante la mayor parte de la gestación; el útero forma entonces una suerte de bolsa distendida. Por su parte inferior, la bolsa aparece sellada por un anillo fuertemente cerrado, el cérvix, gracias a sus fibras de resistente colágeno. Se atribuye el mantenimiento de este estado a la progesterona, una hormona esteroidea que la placenta libera a la circulación materna desde una fase precoz del embarazo. La placenta segrega también estrógeno, un esteroide que antagoniza la acción de la progesterona y estimula la contracción uterina.

Los niveles maternos de estrógenos, bajos en un comienzo, aumentan con el tiempo. La fase de parturición comienza cuando los estrógenos y otros estímulos que favorecen las contracciones uterinas superan a los factores que se les oponen. Conforme crecen los niveles maternos de estrógeno, las células del miometrio, el músculo uterino, sintetizan conexina. Las moléculas de esta proteína migran a la membrana celular para establecer vínculos que mantienen a las células musculares eléctricamente unidas entre sí. Una vez urdida esta malla, las células musculares están en disposición de producir contracciones coordinadas. Al mismo tiempo, los estrógenos estimulan la síntesis de un gran número de receptores de oxitocina en las células del miometrio. Esta hormona, sintetizada en la hipófisis, refuerza la potencia de las contracciones uterinas e induce el parto en un útero preparado.



1. EL MOMENTO DEL PARTO en humanos depende de los niveles de la hormona liberadora de la corticotropina (CRH), proteína que la placenta libera a la circulación materna y fetal. Se dio con ese "reloj placentario" gracias a la medición de los niveles sanguíneos de CRH en medio millar de mujeres, en distintas fases de gestación. Las mujeres con una mayor concentración en una fase precoz (entre las semanas dieciséis y la veinte) presentaban los relojes acelerados; tenían una mayor probabilidad de parto prematuro.

Con esa finalidad, el estrógeno insta la producción de prostaglandinas en las membranas placentarias adyacentes al cérvix. Las prostaglandinas inducen la síntesis cervical de enzimas que digieren las fibras de colágeno. Las enzimas transforman el cérvix en una estructura maleable que se dilatará hasta abrirse cuando la cabeza del feto presione en el instante de la expulsión.

El cortisol, una hormona sintetizada por la glándula suprarrenal fetal, controla que en los pulmones del niño se produzcan los cambios necesarios para que pueda respirar. Los niveles elevados de cortisol estimulan la fabricación de sustancias que evacuan el agua de los pulmones y facilitan su distensión.

Pese a la profundización en el papel desarrollado por los estrógenos en los procesos uterinos y cervicales que desembocan en el parto, continuaba siendo un enigma la naturaleza del cambio que en el feto o en la madre activa la secreción placentaria de estrógenos. Por razones éticas y prácticas obvias, resulta sumamente difícil abordar la investigación directa de los cambios bioquímicos experimentados por el feto, la placenta o la mujer embarazada. Se ha recurrido a ensayos en otros mamíferos, la oveja sobre todo, gracias a los cuales se han encontrado muchas de las claves de la regulación de los mecanismos uterinos y cervicales que llevan al parto.

Inspiradas por el trabajo pionero que Graham C. Liggins acometió en los años sesenta, las investigaciones de cuatro lustros más tarde permitieron identificar el mecanismo básico de regulación en la oveja, el mismo que opera en la mayoría de los mamíferos.

Mediada la gestación, el hipotálamo del feto en desarrollo segrega hormona liberadora de corticotropina (CRH) que induce la liberación a la circulación fetal de la hormona adrenocorticotrófica (ACTH) por la hipófisis. La ACTH activa en las glándulas suprarrenales fetales la producción de cortisol. Esta hormona, a su vez, activa enzimas placentarias que convierten la progesterona en estrógeno. Por tanto, la secreción de progesterona en el torrente materno disminuye, a la par que aumenta la de estrógeno. Cuando en el feto se alcanzan niveles elevados de cortisol se estimula la maduración de los pulmones.

En la oveja no preñada, igual que en la mujer no embarazada, el cortisol se integra en un sistema de retroalimentación negativa. El cortisol circulante frena, en hipotálamo e hipófisis, la liberación de ACTH, lo que a su vez reduce la síntesis de cortisol. Y así los niveles de cortisol, lejos de incrementarse sin fin, permanecen estables. Hacia el final de la gestación, en cambio, el cortisol carece de ese efecto minuente en el feto, sin que sepamos la razón. En consecuencia, los niveles fetales de ACTH

y cortisol y, por ende, los niveles maternos de estrógenos aumentan durante la última parte del embarazo de la oveja. Al final, la concentración de estrógenos de la madre ha alcanzado un valor alto y, uno bajo, los niveles de progesterona; es lo que se exige para desencadenar los mecanismos y procesos que desembocarán en el parto.

Mas, cuando se creía poder ajustar esquema tan coherente, se descubrió que cierta propiedad central no era aplicable a los humanos. Lo mismo que en la oveja, el cortisol fetal estimulaba la maduración pulmonar de los fetos humanos; la administración de fármacos con acción corticoesteroidea a las mujeres en parto prematuro reducía la probabilidad de que el bebé nazca con dificultades respiratorias. Pero el cortisol no ejercía ningún efecto sobre el parto ni inducía el estímulo del parto en las mujeres encinta.

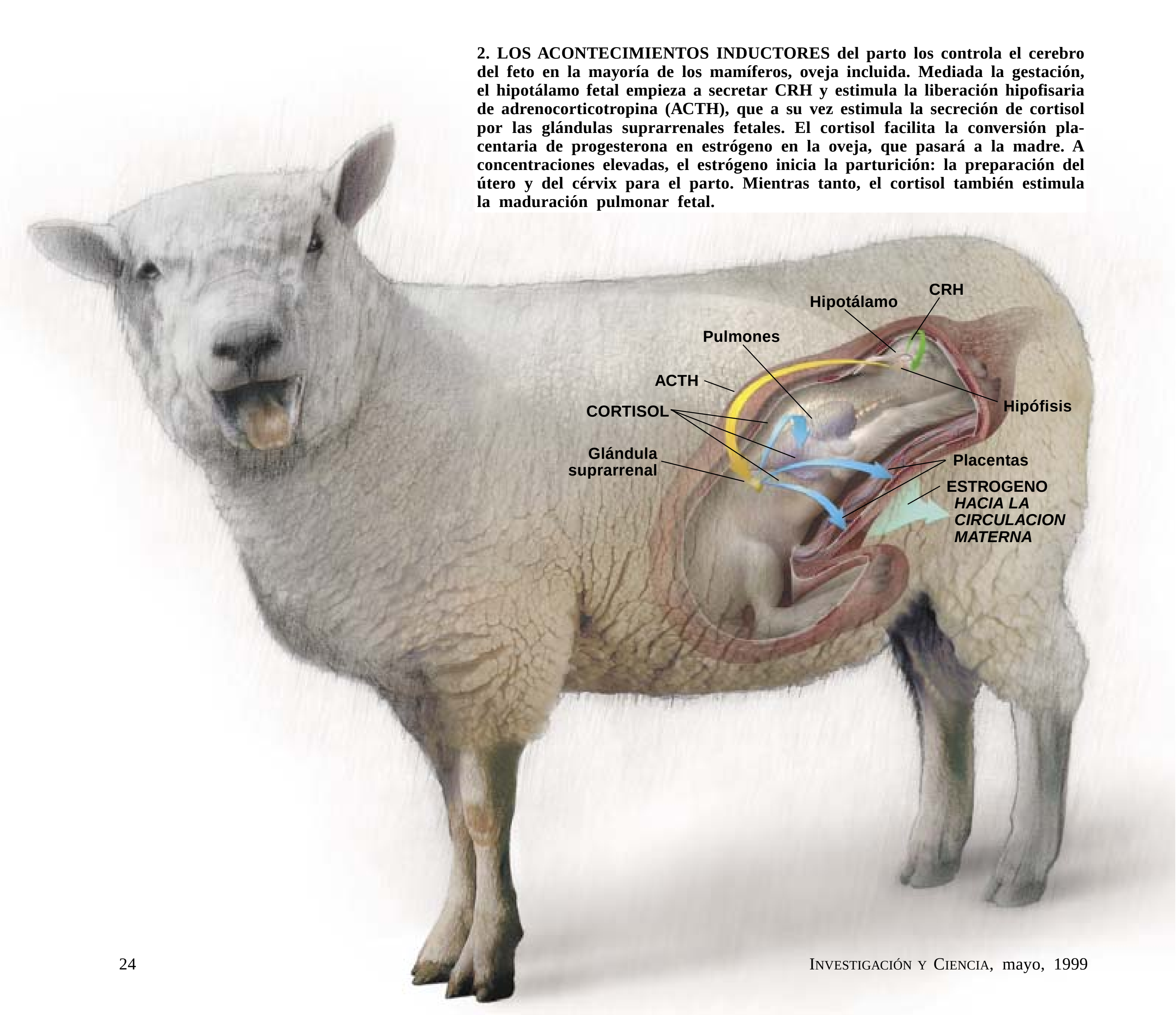
Hoy observamos que la CRH controla la producción fetal de cortisol y la síntesis placentaria de estrógeno y, por tanto, las transformaciones uterinas y cervicales en la mujer y en la oveja. Lo sorprendente es que la mayor parte de la CRH humana se sintetiza en la placenta, no en el hipotálamo fetal. Además la hormona estimula la secreción placentaria de estrógeno por una vía distinta de la observada en la oveja y otros mamíferos no primates.

Los primeros indicios de que la CRH placentaria humana intervenía en los procesos y transformaciones que desembocan en el parto aparecieron en los años ochenta. Por entonces, el equipo de Tamotsu Shibasaki descubrió que la placenta humana contenía CRH. Se entenderá su sorpresa, pues se venía aceptando que el encéfalo era la única fuente de esta hormona.

Al poco, otros equipos demostraron que la concentración de CRH placentaria crecía hasta dejarse ver en la sangre materna hacia el final del embarazo, para luego desaparecer, lo que revelaba una posible función en la preparación del parto. En la segunda mitad de ese decenio, se comprobó que las mujeres abocadas a un parto prematuro presentaban una concentración sanguínea de CRH en el momento de la expulsión más elevada que las mujeres en la misma semana de gestación pero que no habían parido antes de plazo.

Por esas fechas, Mark McLean entró como doctorando en mi laboratorio. Se había propuesto desentrañar la relación entre CRH e inicio de

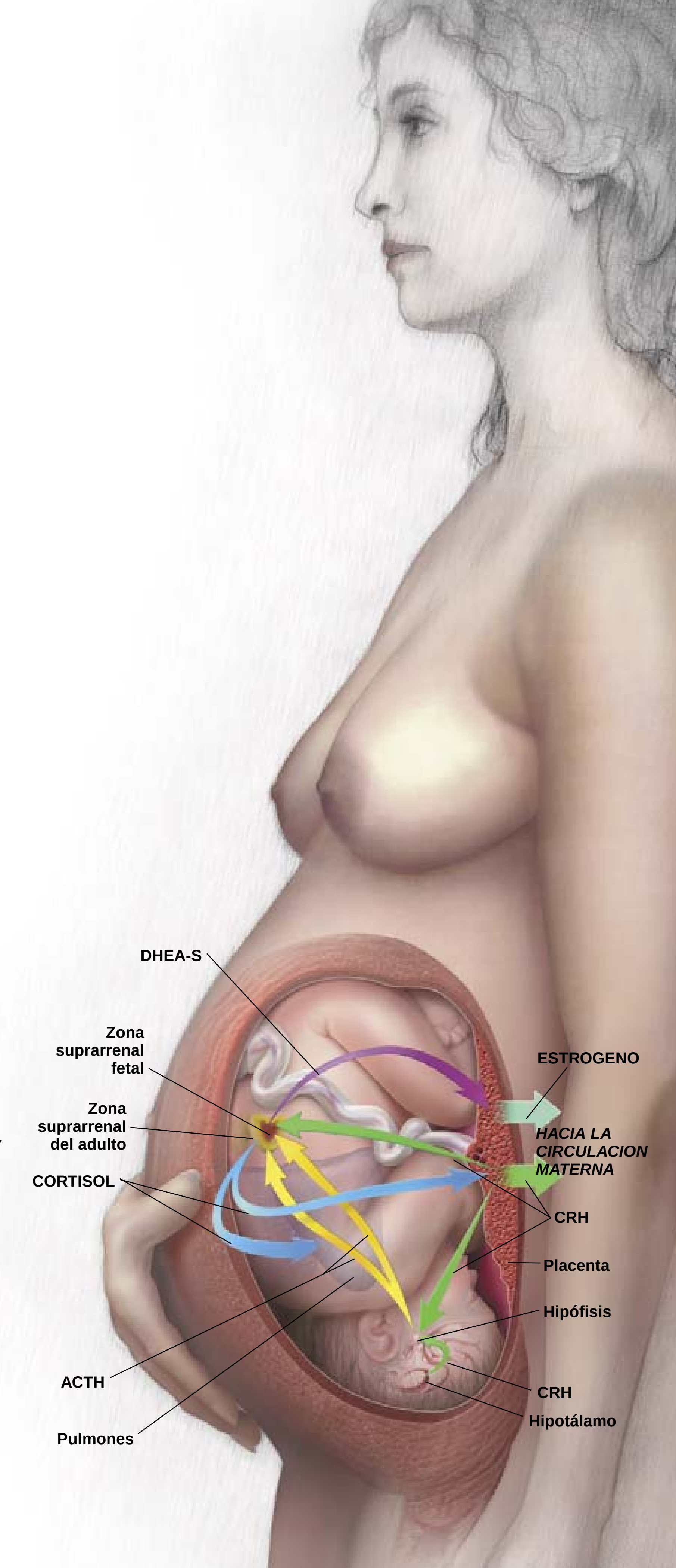
2. LOS ACONTECIMIENTOS INDUCTORES del parto los controla el cerebro del feto en la mayoría de los mamíferos, oveja incluida. Mediada la gestación, el hipotálamo fetal empieza a secretar CRH y estimula la liberación hipofisaria de adrenocorticotropina (ACTH), que a su vez estimula la secreción de cortisol por las glándulas suprarrenales fetales. El cortisol facilita la conversión placentaria de progesterona en estrógeno en la oveja, que pasará a la madre. A concentraciones elevadas, el estrógeno inicia la parturición: la preparación del útero y del cérvix para el parto. Mientras tanto, el cortisol también estimula la maduración pulmonar fetal.



los procesos facilitadores del parto. Tomó muestras sanguíneas de medio millar de mujeres a lo largo de su embarazo, midió la concentración de CRH y después comprobó si ésta guardaba relación con el momento del parto. La ejecución del proyecto, muy laboriosa, llevó varios años. A mediados de los noventa, terminaron los análisis.

A primera vista los resultados no aportaban ninguna sorpresa. Se confirmaba que la concentración de CRH en sangre materna crecía con el progreso de la gestación y se añadía el descubrimiento del aumento exponencial de los niveles durante el embarazo. Pero cuando estudiamos los resultados con mayor detenimiento, dimos con algo de sumo interés, a saber, los valores de CRH entre la decimosexta y la vigésima semana de embarazo (los más precoces que nuestras herramientas permitían detectar) predecían con bastante aproximación el momento del parto en cada mujer. Por si fuera poco, las mujeres que presentaban los niveles más elevados tenían una mayor probabilidad de parto prematuro; las que mostraban los niveles más bajos, una mayor probabilidad de parir más tarde de la cuenta.

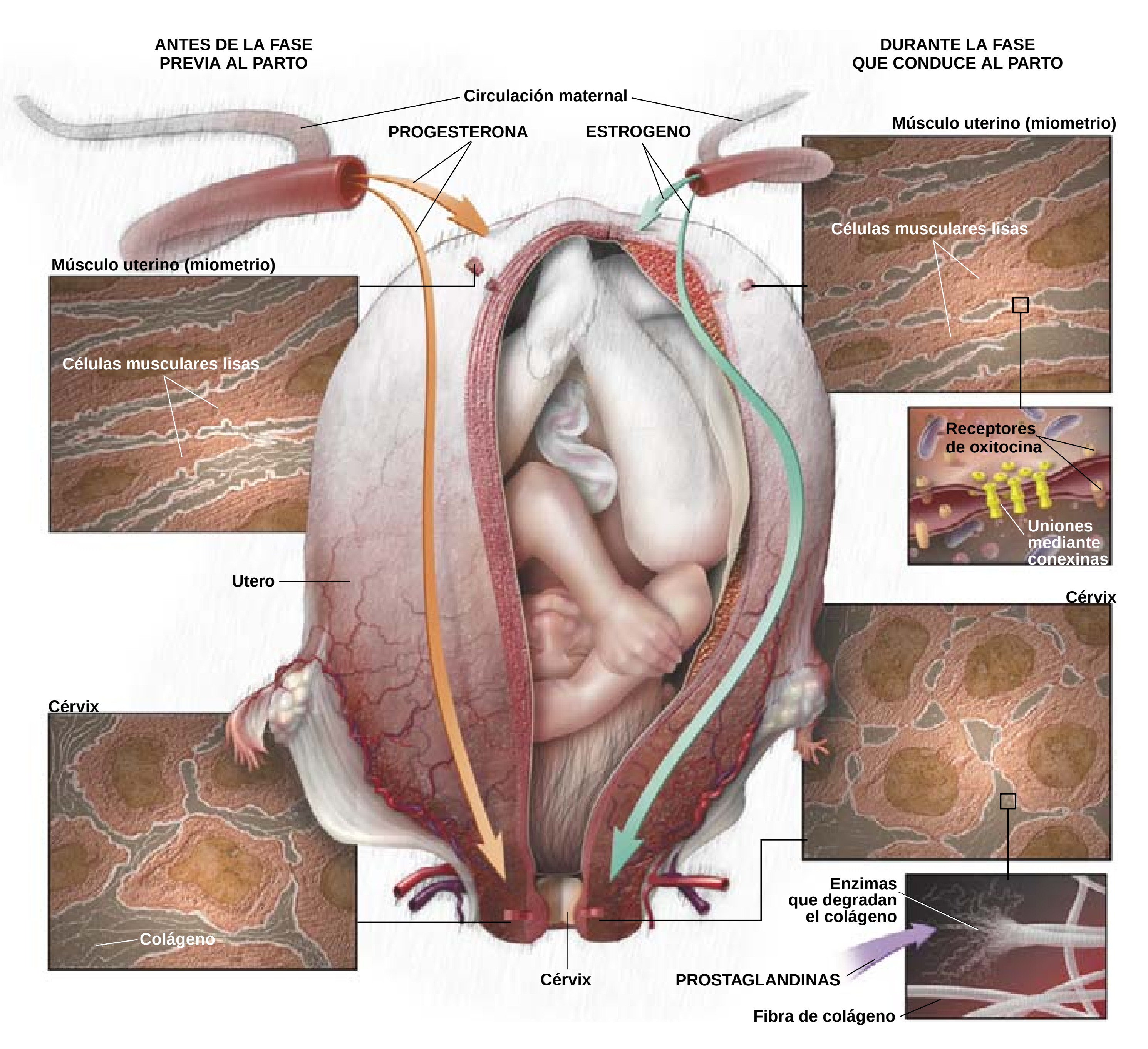
En otras palabras, McLean había descubierto un "reloj" que se sincronizaba en una fase precoz del embarazo y controlaba la velocidad a la que avanzaba éste. La cantidad de CRH en la sangre materna haría las funciones de las manecillas. Quedan ahora escasas dudas de que la producción de CRH controle la duración del embarazo, aunque no debíamos entonces descartar la posibilidad de que la CRH placentaria fuera un mero producto acompañante o un marcador de algún otro proceso que realmente orquestara los procesos que desembocan en el parto.



3. EL CONTROL DE LOS PROCESOS uterinos y cervicales que desembocan en el parto difiere en humanos del observado en la oveja. La CRH no proviene sólo del hipotálamo fetal; su mayor parte se sintetiza en la placenta. La acción de la CRH sobre la hipófisis fetal incrementa la producción de cortisol en la glándula suprarrenal fetal, como ya ocurría en la oveja, pero el cortisol no estimula la fabricación placentaria de estrógenos necesaria para promover los procesos uterinos y cervicales que conducen al parto. Le incumbe promover la maduración pulmonar fetal y coadyuvar en el mantenimiento de la producción placentaria de CRH. La CRH de la placenta y la ACTH de la hipófisis fetal estimulan la secreción de sulfato de dehidroepiandrosterona (DHEA-S) que la placenta convertirá en estrógeno.

Los resultados fueron más interesantes de lo que pudiéramos habernos imaginado. Además de permitirnos ahondar en el conocimiento de la última fase de la gestación, mediante la determinación precoz de los niveles de CRH en el embarazo señalaban el camino para identificar a las mujeres con un mayor riesgo de parto prematuro. Identificación que facilita el seguimiento de las mujeres que deberían alumbrar en un centro equipado con unidades de cuidados intensivos neonatales. Y otra vía abierta: posibilidad de ensayos sistemáticos con nuevos tratamientos preventivos, mediante la comparación de poblaciones equivalentes de mujeres en situación de riesgo de parto prematuro a las que se administrara el tratamiento o se dejaran sin tratar.

No se realizan todavía análisis rutinarios de CRH. Se están sopesando los mejores métodos de medida y el momento apropiado para tales pruebas. La concentración de CRH varía bastante de una mujer a otra. Una concentración normal o baja no garantiza un parto a término. Podría



4. EL ESTROGENO tiene muchos efectos sobre el útero y el cérvix de los mamíferos. Durante la mayor parte de la gestación, la progesterona materna mantiene las células musculares uterinas relajadas y determina que las resistentes fibras de colágeno sellen el cérvix (*izquierda*). Ocurre que el brusco aumento de la concentración de estrógeno hace que las células musculares uterinas presenten receptores para la oxitocina, una hormona que estimula la contracción de estas células durante el parto (*derecha, arriba*). El estrógeno insta la síntesis celular de conexinas, que conectan eléctricamente a las células permitiendo su contracción sincrónica durante el parto. Las prostaglandinas, a su vez, inducen la producción cervical de enzimas que digieren el colágeno (*derecha, abajo*). Estas enzimas ablandan el cérvix.

ROGER SMITH enseña endocrinología en la Universidad de New Castle de Australia. Inició su formación médica en Sydney y la continuó en el hospital londinense de St. Bartholomew, donde obtuvo el doctorado en neuroendocrinología. En 1989 fundó el Centro de Investigación Perinatal.

suceder que, aunque la concentración inicial de CRH no fuera elevada, las infecciones del feto y otros episodios promovieran un parto antes de plazo.

¿Por qué predomina la idea de que la CRH placentaria desempeña un papel crucial en la determinación del momento del parto y no se trata de un mero marcador de otro proceso regulador más potente? La respuesta hay que buscarla en el descubrimiento de la cascada molecular desencadenada por esta hormona y que conduce al incremento de la concentración de estrógenos requerido para el parto.

Una vez establecido que los mecanismos transformantes de útero y cérvix en humanos estaban regulados por un proceso distinto del de la oveja, muchos grupos se lanzaron al estudio de los primates. Los experimentos con simios y antropoides son más complicados que los estudios con ovejas, pero son los únicos que, con nosotros, tienen placenta productora de CRH durante el embarazo.

A finales de los ochenta, el laboratorio del autor y el de Robin S. Goland, de la Universidad de Columbia, estudiaron estos procesos en los babuinos. Sin previo acuerdo, descubrieron que en los babuinos los niveles se incrementaban rápidamente al principio del embarazo, para luego permanecer constante durante el resto de la gestación; en gestantes humanas se da un incremento continuo de las concentraciones de CRH. La observación no parecía encerrar mayor trascendencia hasta que, cierto día de 1996, en el transcurso de un congreso internacional de endocrinología, al que asistieron Eugene D. Albrecht, de la Universidad de Maryland, y Gerald J. Pepe, de la Escuela Médica del Este de Virginia, expertos en gestación de los babuinos, diserté sobre el desarrollo de las glándulas suprarrenales fetales.

Se sabía ya que las glándulas suprarrenales del feto en los primates diferían de las de la oveja y del primate adulto. En la glándula suprarrenal de éste se reconocen una médula central y una corteza externa que secreta cortisol, mientras que la glándula de su feto carece de médula y tiene una corteza donde se perciben dos partes. La interna, o zona suprarrenal fetal, es mayor, mientras que la menor y más externa produce cortisol. La zona suprarrenal también sintetiza una hormona esteroidea, el sulfato de deshidroepiandrosterona (DHEA-S).

A diferencia de lo observado en la oveja, la placenta de los primates carece de las enzimas necesarias para transformar progesterona en estrógeno, susceptibles de regulación por cortisol. La placenta, en cambio, fabrica el estrógeno a partir de DHEA-S. (Esta actividad explica por qué la concentración de progesterona no desciende al final de la gestación en humanos; la placenta humana no puede transformar progesterona en estrógeno, por lo que la primera no desaparece y se mantiene en la circulación materna.)

De los datos aportados por Albrecht y Pepe se desprendía que el tamaño relativo —el tamaño de la glándula comparado con el del feto— de la zona suprarrenal de los babuinos crecía de forma particular. En humanos y en los monos rhesus, el tamaño relativo alcanza su máximo al final de la gestación, pero no el de los babuinos, cuyo máximo aparece mediada la gestación. Más tarde, la zona suprarrenal experimenta un crecimiento lento, para terminar por desaparecer después del nacimiento.

Mientras miraba las diapositivas, reparé en que ese patrón era paralelo al incremento y descenso del CRH placentario en el babuino gestante. Muy probablemente la CRH placentaria controlaba la secreción de DHEA-S en la zona suprarrenal fetal del babuino, ya fuera de forma directa o indirecta. ¿Podría suceder lo mismo en humanos y determinar el incremento tardío de la secreción placentaria de estrógenos?

De vuelta en New Castle, demostré que el tejido suprarrenal fetal en humanos contenía receptores de la CRH, es decir, era sensible a sus señales hormonales. En colaboración con Robert B. Jaffe y Sam Mesiano, de la Universidad de California en San Francisco, comprobamos que la CRH circulante estimulaba en las células de la zona suprarrenal fetal de los humanos la producción de DHEA-S, no de cortisol. (Dichas células sintetizan DHEA-S en respuesta a la ACTH segregada por la hipófisis.)

Para que el parto se inicie sólo cuando el feto esté preparado para vivir fuera del seno materno, el mecanismo regulador debe contemplar que la concentración de estrógenos sea alta antes del alumbramiento y que se produzca cortisol suficiente para asegurar la maduración de los pulmones. La CRH placentaria parece también cumplir con este requisito. Josef A. Majzoub, de la facultad de medicina de Harvard, ha propuesto que la CRH placentaria en la circulación fetal podría estimular la liberación de ACTH en la hipófisis fetal y así estimular la síntesis en la glándula suprarrenal del cortisol necesario para la maduración pulmonar. En otras palabras, la CRH placentaria se halla en una situación óptima para sincronizar el desarrollo fetal y el inicio del parto.

Además de estimular la producción placentaria de estrógenos y la síntesis suprarrenal fetal de cortisol, la investigación sugiere que la CRH actúa directamente sobre el útero y el cérvix. Con ello, podría potenciar los cambios inducidos por los estrógenos o compensar la producción inadecuada de éstos.

Se ha observado que la CRH circulante, al igual que los estrógenos, incrementa en el cérvix de la gestante la concentración de prostaglandinas y facilita su maduración. Y se ha demostrado que la incubación con CRH de fibras de músculo uterino humano refuerza las contracciones inducidas por otras sustancias, entre ellas la oxitocina, una hormona.

Eduard W. Hillhouse y Dimitri Gramatopoulos, de la Universidad de Warwick, han observado que en las células musculares uterinas pueden aparecer distintas formas de receptor de CRH, cuyas proporciones relativas cambian durante los procesos que estimulan el parto. En el comienzo de la gestación, los receptores de la hormona CRH reaccionan a su estímulo mediante procesos intracelulares vinculados con la relajación de las células musculares. Más tarde, en la última fase del embarazo, los receptores de un útero ya maduro promueven la contracción.

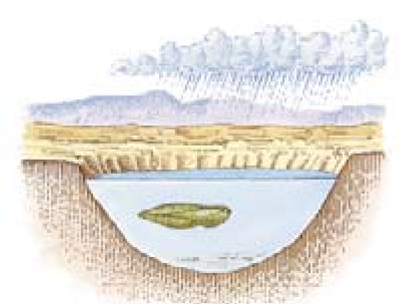
¿Por qué la placenta sintetiza CRH? ¿Quién controla su cuantía? No lo sabemos. Majzoub y Bruce G. Robinson, de la Universidad de Sydney, han demostrado que, una vez que la placenta empieza a liberar CRH, el cortisol puede mantener su secreción. Algunos factores pueden determinar que una mujer sintetice más CRH

Una clave evolutiva de los sapos

¿Cuándo se convirtió la CRH en reguladora del ritmo del embarazo? Un descubrimiento reciente en anfibios apunta a un origen muy lejano. El sapo *Scaphiopus hammondii* pone sus huevos en charcas formadas por la lluvia. Si las charcas se secan, los renacuajos atraviesan una rápida metamorfosis para convertirse en sapitos (*hilera superior*). Si la charca se mantiene, los renacuajos se desarrollan de forma más lenta y crecen más antes de la metamorfosis (*hilera inferior*).

Robert J. Denver, de la Universidad de Michigan, ha hallado que los efectos ambientales están mediados por la CRH, que se sintetiza en notable concentración en los renacuajos privados de lluvia. De ello cabe inferir que la CRH controlaba el desarrollo antes de que aparecieran los mamíferos.

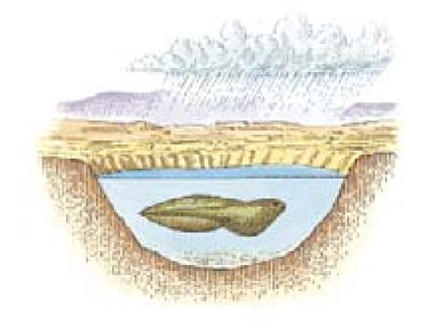
—*R.S.*





Si la charca se seca ...





Si la charca no se seca ...

que otra desde el principio; pensamos, por ejemplo, en diferencias nutricionales al inicio de la gestación o en variaciones sutiles en la constitución genética de las células de la placenta productoras de CRH.

La producción placentaria humana de CRH procede poco a poco, así parece, desde su inicio en la duodécima semana de gestación. Al principio se estimula la secreción de pequeñas cantidades de DHEA-S en la zona suprarrenal fetal en desarrollo, que la placenta convierte en estrógeno. Mientras tanto, la CRH sintetizada en la placenta, y probablemente también la del cerebro fetal, estimulan en la otra parte de la glándula la liberación de cortisol a la circulación fetal. Según Majzoub y Robinson, el cortisol estimula a su vez la liberación placentaria de la CRH. Se forma un sistema de retroalimentación positiva en el que la producción de CRH no se cierra, sino que el circuito opera sin tregua. Cuando se superan determinados umbrales críticos de CRH, estrógenos, prostaglandinas y otros factores, aparecen cambios en el útero y el cérvix que inducen el parto.

Pero el cuadro no está acabado. En los mecanismos que conducen hacia el alumbramiento intervienen otros factores distintos de ese bucle de realimentación autoabastecido. Uno de ellos, el tamaño del feto. Este ejerce presión sobre el músculo uterino que, a su vez, potencia la susceptibilidad muscular a los estímulos de contracción.

I. Caroline McMillen, de la Universidad de Adelaida, sugiere agregar el estado nutricional del feto. La escasez de nutrientes puede precipitar el parto en la oveja, recorte que se da cuando el feto ha crecido mucho y la placenta ha envejecido. Algunas observaciones en humanos respaldan esa idea. Las gestantes judías que respetan el ayuno del Yom Kippur y que, por tanto, reducen el aporte de nutrientes al feto, presentan un máximo relativo de partos que no se observa durante la misma efemérides en gestantes beduinas que viven en la misma región y no ayunan. La nutrición inadecuada podría activar el sistema de estrés fetal, en el que interviene la producción hipotalámica de CRH en el feto. Se cree que la CRH liberada por el hipotálamo incrementaría los niveles de ACTH y cortisol y redoblaría con ello la actividad del circuito de inducción del parto.

El descubrimiento de que los estrógenos y la CRH potencian la contractilidad del músculo uterino dibuja un guión más complejo. Hemos presentado una secuencia que parece regular la inducción del parto. Pero algunos aspectos del mecanismo de control podrían ser redundantes. La acción directa de la CRH sobre el músculo uterino podría, por ejemplo, desempeñar un papel menor la mayoría de las veces, para adquirir importancia crítica si cae la síntesis de estrógenos. Tal redundancia puede ser algo más que un control de seguridad. Stuart A. Kauffmann ha apuntado que la redundancia de los sistemas complejos facilita la evolución de tales sistemas. Si un cambio en una vía redundante mejora la función del sistema, la modificación se conservará. Si supone un perjuicio, otra vía alternativa evitará que el cambio sea letal.

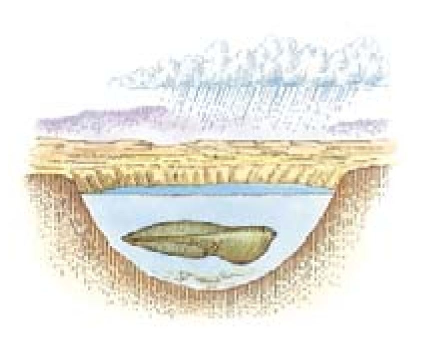
Para estudiar la evolución del sistema de regulación de la estimulación del parto en humanos, mi equipo colaboró con el de E. Jean Wickings, del Centro Internacional de Investigación Médica de Franceville, Gabón. Acometimos una serie de experimentos para determinar el momento en que los primates adquirieron controles más complejos que los de otros mamíferos y la razón de este cambio.

La CRH desempeña un papel director del desarrollo cuya historia evolutiva se remonta quizás a un





... los renacuajos sufren una metamorfosis rápida.







... los renacuajos sufren una metamorfosis lenta.

tiempo anterior al instante en que los mamíferos compartieron tierra firme con anfibios y otros. Robert J. Denver, de la Universidad de Michigan, ha observado que la CRH condiciona la velocidad a la que los renacuajos del sapo *Scaphiopus hammondii* se desarrollan y metamorfosean en sapos adultos.

No menos fascinantes que las cuestiones evolutivas son las posibilidades de prevenir el parto prematuro. Armados ya de un conocimiento más sólido del sistema de regulación en los humanos, podemos considerar diversas opciones terapéuticas.

Varios grupos de investigadores, entre ellos los del autor, estudian el empleo de inhibidores de la CRH para prevenir los partos prematuros. En colaboración con el grupo de George P. Chrousos, del Instituto Nacional de Salud, mi equipo ha observado que la antalarmina, antagonista de la CRH, retrasa el parto en la oveja. Si los antagonistas demuestran su eficacia e inocuidad en primates no humanos, los ensayos con humanos constituirán la próxima etapa. Ya se preparan ensayos en humanos con antagonistas de la oxitocina. Investigaciones provisionales en mujeres revelan el posible interés de los bloqueantes de prostaglandinas.

También se trabaja sobre la identificación de mujeres en riesgo. Por tanto, mientras se explora el valor de las medidas de la concentración de CRH en la sangre materna, continúa la búsqueda de otros marcadores. En el laboratorio del autor se investiga si el incremento inesperado de la concentración de las enzimas del cérvix colagenolíticas permite identificar a las gestantes expuestas a un adelanto del parto.

Mi laboratorio ha observado también que el nivel de CRH materna puede ser un indicador útil del posible éxito de la inducción artificial del parto. Las gestantes con niveles más altos de CRH tienen una mayor probabilidad de responder a la inducción que las que presentan niveles bajos.

El camino parece expedito para el desarrollo de pruebas a través de las cuales descubrir las mujeres embarazadas con un mayor riesgo de parto prematuro. También se abre una ventana a la producción de fármacos que modifiquen la síntesis de CRH o que retrasen el reloj placentario que controla el ritmo del embarazo. Las medidas de aplicación práctica se beneficiarán de los resultados que ofrezca la investigación básica. En conjunto, ambos tipos de investigación persiguen una meta preciosa: que cada vez más los niños nazcan con la posibilidad de desarrollar todo su potencial, libres de minusvalías asociadas a partos prematuros.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PLACENTAL CLOCK CONTROLLING THE LENGTH OF HUMAN PREGNANCY. Mark McLean y col., en *Nature Medicine*, vol. 1, n.º 5, págs. 460-463, mayo 1995.

AT HOME IN THE UNIVERSE: THE SEARCH FOR LAWS OF SELF-ORGANIZATION AND COMPLEXITY. Stuart Kauffman. Penguin Books, 1995.

PRODUCTION OF PREMATURE DELIVERY IN PREGNANT RHESUS MONKEYS BY ANDROSTENEDIONE INFUSION. C. A. Mecenas y col., en *Nature Medicine*. vol. 2, n.º 4, págs. 443-448; abril 1996.

CORTICOTROPIN-RELEASING HORMONE DIRECTLY AND PREFERENTIALLY STIMULATES DEHYDROEPIANDROSTERONE SULFATE SECRETION BY HUMAN FETAL ADRENAL CORTICAL CELLS. R. Smith y col., en *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. vol. 83, n.º 8, págs. 2916-2920; agosto 1998.

Tim Beardsley

BEN SHNEIDERMAN: El hombre por encima de la máquina

Si los programadores informáticos dejan de elaborar de una vez iconos humanoides y voces afectadas que aconsejen al usuario cómo habérselas con unos programas cada vez más abrumadores, habrá que agradecérselo a Ben Shneiderman, director del laboratorio de interacción entre el hombre y el ordenador de la Universidad de Maryland. Shneiderman, quien desde 1981 viene defendiendo que los programas eficaces permiten la manipulación directa de objetos en la pantalla, ha emprendido una campaña personal para desterrar de ese ámbito los antropomorfismos, que considera una afrenta a la dignidad humana. La sola mención de los "agentes" informáticos que operan por su cuenta anticipándose a las necesidades del usuario le repugna.

Según Shneiderman, agentes y programas de este jaez, promocionados por Patti Maes, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), son una nueva versión del "juego de mimetismo", la larga e insípida tradición de fabricar dispositivos que se parecen a los humanos o los imitan. Los considera descendientes de las muñecas mecánicas del siglo XVII que divertían a los cortesanos tocando instrumentos musicales, y con las mismas posibilidades que ellas de aliviar la suerte de la doliente humanidad. Pero las críticas de Shneiderman tienen también su lado serio. Piensa que aumentar la autonomía de los ordenadores plantea inquietantes cuestiones, como la del sujeto sobre quien recae la responsabilidad si las máquinas que controlan el tráfico aéreo o los aparatos médicos, por ejemplo, cometen un error fatal. (Temor que Maes se toma ahora en serio.) Y rechaza de plano la idea concomitante de proporcionarles "emociones" a los ordenadores para que "tranquilicen" a un usuario en apuros. "Las máquinas no tienen emociones", afirma rotundo.

Extiende su desdén a las penalidades del MIT por crear un robot humanoide llamado Cog, basado en principios de diseño biológicos. El plan es una distracción "peligrosa", declara. Podría dar como resultado, añade, "mejores muñecos animatrónicos para el parque de atracciones de Disney o mejores maniquíes para las pruebas de choques".

James A. Landay, de la Universidad de California en Berkeley, confiesa que las opiniones de Shneiderman sobre los agentes y los programas autónomos en general han obligado a abordar difíciles cuestiones acerca de la responsabilidad de las acciones de las máquinas. Y Terry Winograd, de la Universidad de Stanford, está de acuerdo en que su "energía y entusiasmo" han supuesto "un bien empleado correctivo" a las afirmaciones grandilocuentes que se vertieron sobre los agentes. Pero Oren Etzioni, de la Universidad de Washington, presidente de la conferencia Agentes'99, replica que Shneiderman olvida las ventajas que pueden reportar los agentes. "Claro, se pierde algo de control. Ese es el precio. Pero el beneficio es enorme", mantiene Etzioni.

Maes, por su parte, le recrimina que ataque molinos de viento. Subraya que la meta de la investigación sobre los agentes no consiste en imitar la inteligencia humana, sino en ayudar al usuario que adolece de un exceso de información proporcionándole "programas predecibles, comprensibles, simples", que puedan actuar en su nombre. En su opinión, las órdenes que un usuario imparte a un agente corren de su responsabilidad.

Shneiderman se propone "multiplicar por 1000 la creatividad humana". Salpica sus opiniones con gestos, sonrisas y encogimientos de hombros que suscitan una atmósfera de benévola sensatez. "Las exploraciones creativas" en la inteligencia artificial son razonables, admite. Pero, prosigue, la mayoría de la gente no quiere tener tratos con un "engaño", un programa que se presenta con ropaje humano. Se queja de que se malgasta el dinero en proyectos de inteligencia artificial que muchas veces persiguen objetivos oscuros y son incapaces de evaluar sus resultados adecuadamente. Cita el ejemplo de una interfaz de lenguaje natural en Unix cuyo autor relataba que no había tenido tiempo de someterla a ensayo con usuarios poco experimentados. Shneiderman recalca que se debería verificar la facilidad y velocidad de uso de los programas, así como el número de errores que provocan.



1. Ben Shneiderman sostiene que los ordenadores deberían alentar la creatividad humana

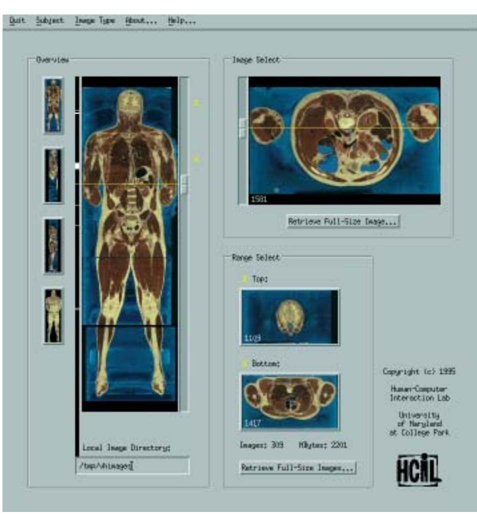
En el fondo, se siente un humanista. Su respeto sin límites por el potencial humano parece colocarle próximo al vitalismo, aunque concede que no hay razón por la que los hombres no puedan acabar por conocer cómo funciona la mente humana. Pero insiste en que la mayor parte de la investigación que se lleva a cabo bajo el estandarte de la inteligencia artificial sólo ha servido para frenar el progreso con técnicas más accesibles. Los investigadores de la inteli-

gencia artificial poseen “un modelo tan superficial de la actuación y de las emociones humanas... ésa es la tragedia”, observa. Mantiene que los retrasos en la concepción de máquinas que puedan responder al lenguaje natural han forzado a los trabajadores a posponer esa meta hasta dentro de un decenio. Deep Blue, el ordenador de IBM que batió al campeón de ajedrez Garry Kasparov, es “simplemente un instrumento con tanta inteligencia como pueda tener un lápiz”, escribió Shneiderman.

Las personas, por el contrario, poseen “una viva creatividad e innovan de un modo que a mí me asombra, desafiando los modelos simples”, afirma. Así que lo último que necesitan es “un colega electrónico o un cajero automático parlanchín”. Las marcas y los productos que tratan de insinuar una inteligencia al estilo de la humana no duran nada. Tillie el cajero y Harvey el banquero, primitivos cajeros automatizados, se han reunido en el cubo de la basura de la historia de los ordenadores con el Colega Cartero del Servicio de Correos de los Estados Unidos y con Bob el de Microsoft, dos personajes informáticos. La progenie electrónica de Bob, Einstein y Clip-It, que ahora se distribuyen con el paquete Microsoft Office, seguirán el mismo camino, predice.

Hijo de periodistas, creció en los círculos intelectuales europeos de Nueva York, donde se aprecian las humanidades tanto como la técnica. (Su tío, David Seymour, ha recorrido el mundo fotografiando desde guerras hasta actrices para *Look, Life* y otras revistas). Mientras estudiaba física en la universidad municipal de Nueva York, en los años sesenta, le cautivó el entusiasmo despertado con el lanzamiento del Sputnik hacia todo lo científico. Resistiéndose a especializarse e inspirado por el retrato de aldea global electrónica que describió Marshall McLuhan, buscó la manera de “salirse de la cultura lineal” a través de la electrónica. Intentó unir la psicología y la informática mientras seguía con un ojo puesto en las humanidades. Ha enseñado en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook y en la de Indiana antes de trasladarse a Maryland.

Le gusta reiterar que el propósito de la computación son las ideas, no los números, y del mismo modo el propósito de la visualización son las ideas, no las imágenes. Lo que la gente busca en sus interacciones



2. La interfaz del hombre visible incorpora disposiciones de datos controlables diseñados por Shneiderman

con los ordenadores, argumenta, es un sentimiento de dominio. Eso se obtiene con interfaces que sean controlables, consistentes y predecibles. La manipulación directa de objetos en la pantalla —por ejemplo, tirar un archivo a la papelera— es la solución ideal. El diálogo en lenguaje natural es una causa perdida (excepto como ayuda para los discapacitados visuales) porque frena el pensamiento del usuario. “Lo que queremos es volar por una biblioteca, no imitar el diálogo con una bibliotecaria.”

Cree que, a diferencia de los sistemas adaptativos, que cambian su comportamiento en maneras no elementales, los programas que triunfan son los que ofrecen acciones rápidas, progresivas y reversibles. Tales principios le llevaron a inventar, a principios de los años ochenta, lo que se conoce ahora por hiperenlace, en un videodisco para la exposición del Museo Memorial del Holocausto de los Estados Unidos que él ayudó a diseñar. Una pantalla verde ofrecía ítems numerados en un menú: Shneiderman decidió prescindir de los números y destacar palabras para denotar las elecciones (sus investigaciones están tras ese color azul pálido de la mayoría de los enlaces). Esta idea la comercializó Cognetics con el nombre de “hipervínculos” y fue utilizada en un llamativo libro electrónico para profesionales de la informática y en una exposición de la Institución Smithsoniana. Tim Berners-Lee, el creador de la Red, citó esta idea en 1989 en uno de sus primeros esbozos del proyecto. Desde entonces, Shneiderman ha trabajado en las pequeñas pantallas de alta precisión utilizadas en los ordenadores de bolsillo y agendas electrónicas.

Hoy supervisa proyectos muy dispares. Su lema, repetido 12 veces consecutivas en su manual *Diseño de Interfaces de Usuario*, es “primero un panorama general, agrandar y filtrar, luego detalles a medida”. Le gustan los árboles de búsqueda poco ramificados, los controles desplazables y las pantallas llenas de información con paneles para representar visualmente datos coordinados. “Un píxel es demasiado valioso como para echarlo a perder.”

Con sus colegas Chris North y Catherine Plaisant ha aplicado estos principios para construir una interfaz que facilita a los investigadores la selección de imágenes del Hombre Visible, obra digital de la Biblioteca Nacional de Medicina, que contiene miles de secciones de un cadáver en alta resolución. Spotfire, otro producto comercializado, muestra los datos en forma de manchas de color y tamaño codificados en unos gráficos cuyos ejes se pueden seleccionar y cambiar de escala a voluntad.

Spotfire y otros programas similares son “una nueva forma de telescopio” en virtud del cual podemos percibir, en los datos, estructuras que se nos escaparían sin remisión. E importantes clientes están convencidos de que él tiene algo que ofrecer. La Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA) ha adoptado una de las ideas de su grupo como interfaz para su directorio raíz de investigación sobre el cambio climático.

El último libro de Shneiderman, *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, escrito junto con Stuart K. Card y John Mackinlay, se publicó en enero. Su proyecto a largo plazo responde al nombre de genex, un plan no muy preciso para mejorar los programas con vistas a la creatividad. Piensa que a los programas actuales les queda mucho camino por recorrer aún hasta maximizar el potencial humano. Algunas de las nociones que contempla en su proyecto genex: navegar jerárquicamente, formatos autodescriptivos y hacer avanzar los documentos sincronizadamente. “Hemos de hacer algo más que enseñarle a nuestros hijos a navegar por la Red. Les tenemos que enseñar a hacer olas”, manifiesta. Diríase que él ha desencadenado ya una buena tempestad.

Nuevos frutales

El azufaifo

En la fruticultura actual existe una excesiva polarización hacia determinados cultivos (peral, manzano, cítricos, melocotonero, uva de mesa, etcétera). La demanda por los consumidores de una oferta más amplia, junto con la búsqueda por los agricultores de especies alternativas, es lo que hace diversificarse al sector. Entre las especies frutales de creciente interés destaca el azufaifo.

El azufaifo (*Zizyphus jujuba* Mill.), también conocido como jinjolero, es un árbol frutal caducifolio perteneciente a la familia Rhamnaceae, que llega a los países mediterráneos y sur de Portugal procedente de China. En España se encuentra diseminado por Murcia, Andalucía, Valencia, Cataluña y Aragón.

Se caracteriza por ser de porte medio, espinoso y muy ramificado. Las ramas toman forma tortuosa, irregular y caprichosa. Su follaje, abundante, brota en haces desde los nudos de las ramas. Se trata de hojas simples, lanceoladas, coriáceas y brillantes con el borde aserrado.



Detalle de un azufaifo en plena producción



Azufaifas maduras

Echa flores pequeñas, con cinco pétalos dispuestos en estrella de color verde amarillento. Los frutos, las azufaifas o jínjoles, son drupas carnosas y brillantes, de color verde en principio para evolucionar hasta tonalidades amarillas que al final se tornan rojizas. El tamaño, según la variedad, oscila entre el de una aceituna y el de una nuez. Contienen una semilla leñosa surcada longitudinalmente. La pulpa posee un sabor dulce agradable, ligeramente ácido, poco jugosa, de naturaleza harinosa y mucilaginosa similar a la del dátil.

Esta planta despierta del letargo invernal al principio de la primavera, florece entre junio-julio y sus frutos comienzan a madurar en septiembre. A finales de otoño deja de vegetar, caen las hojas y quedan las ramas desnudas, latentes hasta el nuevo ciclo.

En regiones de clima árido y semiárido el azufaifo se muestra bastante resistente, soporta variaciones termométricas entre –10 y 50 ºC, vegetando en secano en los límites del desierto. Se adapta a suelos salinos.

En España el conocimiento del azufaifo data de antiguo. Cultivo siempre marginal, en linderos y límites de acequias, se trataba del azufaifo común, de frutos pequeños similares en tamaño al de aceitunas. A mediados de los años ochenta empieza a ensayarse su cultivo en plantación regular en el Valle del Guadalentín (Murcia) empleándose una variedad que presenta frutos de tamaño mayor y superior interés comercial. Hay ahora en el Valle del Guadalentín tres variedades: Común (frutos pequeños), Mu-shing-hong (frutos medianos) y Li (frutos gigantes). La variedad Li es la más apreciada por los consumidores debido al mayor tamaño de las azufaifas (30-40 piezas por kilogramo).

Las azufaifas, ricas en hierro y potasio, contienen alrededor de un 18 % de azúcares (hexosas y sacarosa), 1 % de fibra bruta, 0,5 % de pectina (productora de abundante mucílago), 1,5 % de proteínas, ácidos orgánicos entre los que destacan málico y tar-

tárico, y entre 1 y 2,5 g kg^{-1} de ácido ascórbico (vitamina C), lo que supone entre 2 y 4 veces el contenido de los frutos cítricos.

JOSÉ ANTONIO FERNÁNDEZ LÓPEZ
E.T.S. de Ingenieros Agrónomos
Universidad de Murcia

JUAN FERNÁNDEZ RUBIO
Consejería de Agricultura de la
Región de Murcia

Avances en genética

Mutación específica de genes en el ratón

Los genes ejercen un papel principal en el desarrollo y mantenimiento de los organismos. Algunas mutaciones provocan desórdenes, imperceptibles o muy graves e incluso letales (enfermedades hereditarias), cuyos efectos frecuentemente se manifiestan desde temprana edad. Por eso, la investigación biomédica se ha propuesto crear medios terapéuticos para combatir estas enfermedades.

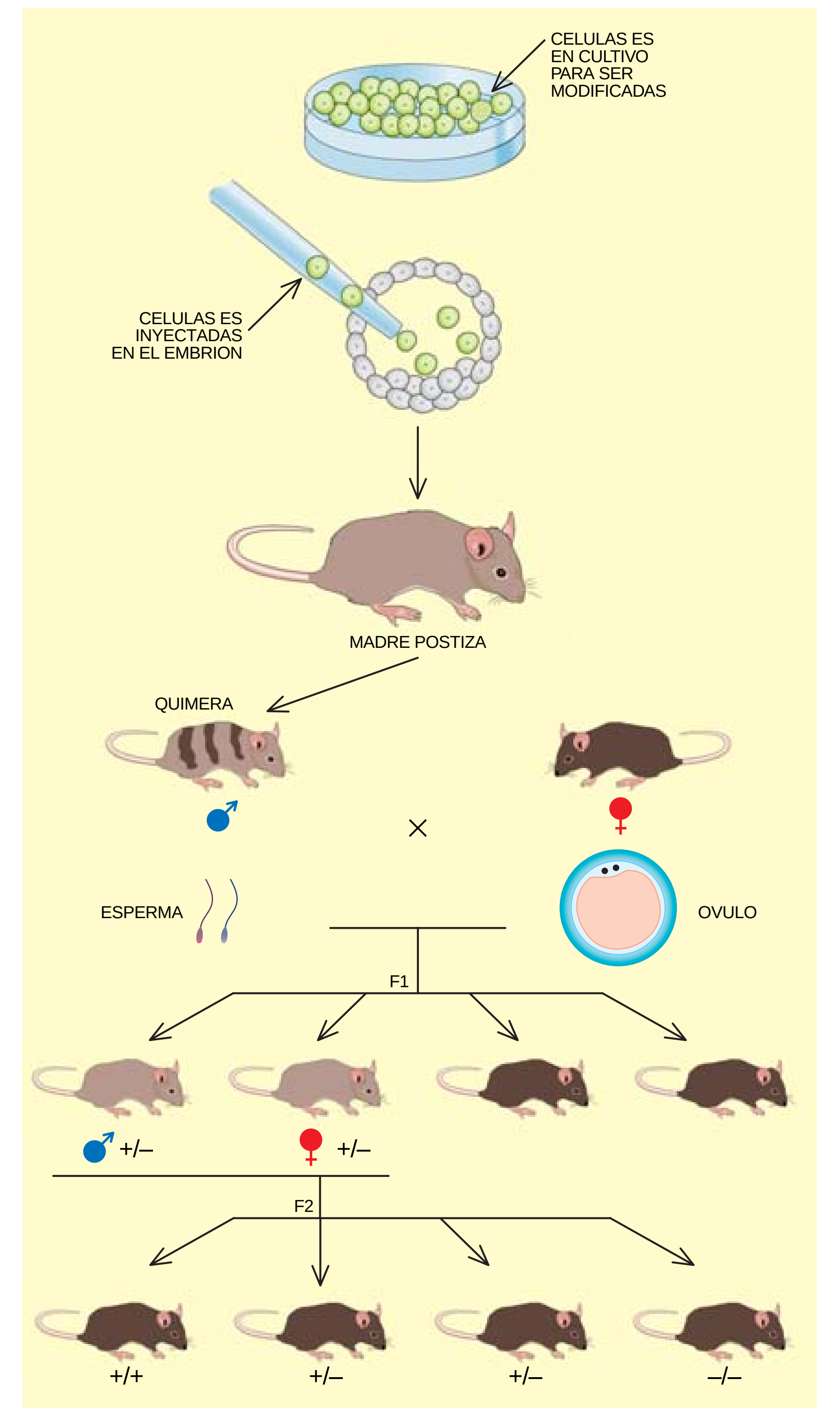
Debemos al Proyecto del Genoma Humano avances espectaculares en el descubrimiento de genes afectados en algunas enfermedades. Pronto dispondremos de la secuencia completa de nucleótidos del ácido desoxirribonucleico (ADN) humano. Pero esa esperanza no debe hacernos olvidar que necesitamos entender el curso de cada enfermedad para poder idear terapias eficaces. Para obtener esa información podríamos estudiar los sujetos enfermos; pero es muy poco lo que sacaríamos por ese camino, habida cuenta de la complejidad de las enfermedades. Por suerte ciertas enfermedades pueden reproducirse, al menos en parte, en animales de laboratorio.

Entre los mamíferos, el ratón (*Mus musculus*) constituye un buen modelo para este tipo de investigación. Posee características óptimas: corto tiempo de generación, camadas grandes, facilidad de mantenimiento y conocimiento disponible de su genética. Además, contamos con la técnica precisa para alterar su material hereditario, lo que facilita la investigación *in vivo* con ratones transgénicos.

Para obtener ratones transgénicos, que portan cambios en genes específicos del genoma, se parte de células madre embrionarias (células ES). Las células ES derivan de un embrión de ratón y sobreviven y se reproducen indefinidamente en una caja de cultivo celular. En este ambiente, su material genético puede ser objeto de manipulación experimental (mutado), sin destruir el potencial de las células para contribuir a la formación de un ratón completo cuando se trasplanten en un nuevo embrión.

El ratón que se desarrolla está, pues, formado por células del embrión inyectado y por células derivadas de las células ES trasplantadas. De ahí que se le conozca por ratón quimérico o quimera.

Las células ES pueden formar parte de cualquiera de los tejidos de la quimera. Si pertenecen a células germinales (óvulos o espermatozoides),



cuando la quimera se reproduzca producirá descendientes que portan la mutación originalmente introducida en las células ES durante su cultivo *in vitro*. Los efectos de la mutación introducida pueden estar presentes en los descendientes de la quimera (generación F_1) o, más frecuentemente, pueden estar presentes en los descendientes de la generación F_1 (generación F_2) que porten la mutación en las dos copias del gen bajo estudio. Estos ratones constituyen ahora una fuente abundante de material experimental, y en ellos podemos investigar el progreso de la enfermedad y someter a prueba terapias.

Son muy dispares las mutaciones que podemos inducir en las células ES sembradas en un cultivo. Disponemos de un conjunto de técnicas que permiten la generación de mutaciones sutiles que comprometen a unos pocos pares de nucleótidos o de grandes deleciones donde se ven incursos varios millones de pares de nucleótidos. Algunas mutaciones pueden incluso introducirse de una manera transitoria o sólo en tejidos específicos durante el desarrollo del organismo.

La mutagénesis específica se basa en la recombinación de segmentos homólogos entre una molécula mutagénica (vector) y el gen endógeno que se trata de mutar; esa operación de recombinación se ejecuta en el núcleo de las células ES. En los primeros procedimientos de mutación específica se buscaba destruir la función del gen bajo estudio. Pero sacaremos más información si, en vez de destruir un gen, sólo se modifica. Con ese propósito se han desarrollado protocolos experimentales que permiten la introducción de cambios de nucleótidos. En la aplicación de uno de estos últimos métodos descubrimos la importancia del gen *Hoxb-4* en la determinación de la forma de algunas vértebras del cuello durante el desarrollo embrionario.

Se ha recurrido también a ese tipo de técnicas para introducir mutaciones que simulen un cambio característico de alguna enfermedad. De entrada se requiere conocer el gen afectado en la patología. Pese al progreso registrado en este dominio, resulta todavía muy alto el número de enfermedades genéticas humanas cuya base molecular ignoramos. Además, muchas enfermedades no son producto de la modificación de un solo gen, sino de la pérdida o duplicación de grandes segmentos cromosómicos.

A mediados de 1993 se hacía patente la necesidad de métodos que permitieran introducir cambios a nivel cromosómico en el material hereditario de ratones. Con esa idea desarrollamos la ingeniería cromosómica a través de la combinación de varias técnicas de mutagénesis específica en células ES ya disponibles. La ingeniería cromosómica consta de tres pasos consecutivos, a través de los cuales en el genoma de las células ES se eliminan, duplican o cambian de posición (se traslocan) grandes segmentos específicos de un cromosoma. Para esto, nos servimos de una enzima bacteriana llamada Cre recombinasa. Cre recombina dos fragmentos de ADN de secuencia específica llamados sitios *loxP*. Los fragmentos se han introducido previamente en lugares definidos del cromosoma. El tipo de cambio (deleción, duplicación o traslocación) provocado en el segmento del cromosoma limitado por los sitios *loxP* depende de la orientación y posición de estos últimos.

En resumen, podemos generar virtualmente cualquier tipo de cambio en el genoma de un ratón, lo que nos faculta para estudiar la función de los productos de los genes en el organismo completo normal y sus alteraciones durante períodos de enfermedad. El proyecto del Genoma Humano nos proporcionará la base física de la herencia (secuencia de nucleótidos). La biomedicina usará este conocimiento para entender las dinámicas de la expresión espacio-temporal de la información contenida en el pequeñísimo núcleo de cada una de nuestras células.

RAMIRO RAMÍREZ SOLÍS
Instituto de Biociencias y Tecnología
Departamento de Patobiología Veterinaria
Universidad de Texas A&M

Dirrutenio

Propiedades de sus compuestos

Escribía profético M. H. Chisholm en *Reactivity of Metal-Metal Bonds*: "lo que puede hacer uno también lo pueden hacer dos... y es más interesante". Los elementos de transición de la tabla periódica pueden formar compuestos constituidos por un átomo metálico rodeado por una serie de iones o moléculas neutras, llamados ligandos.

Los compuestos resultantes, o complejos, se cruzan en nuestra vida diaria, algunos de ellos desde la formación de la vida misma. Un complejo de hierro (hemoglobina) transporta oxígeno desde los pulmones hasta las células, para regresar a los pulmones e iterar el proceso.

Otros complejos, elaborados por el hombre, sirven de catalizadores en la industria petrolera, para convertir muchos subproductos (las olefinas) en sustancias químicas útiles para otras industrias o por sí mismas, como las fibras o los plásticos.

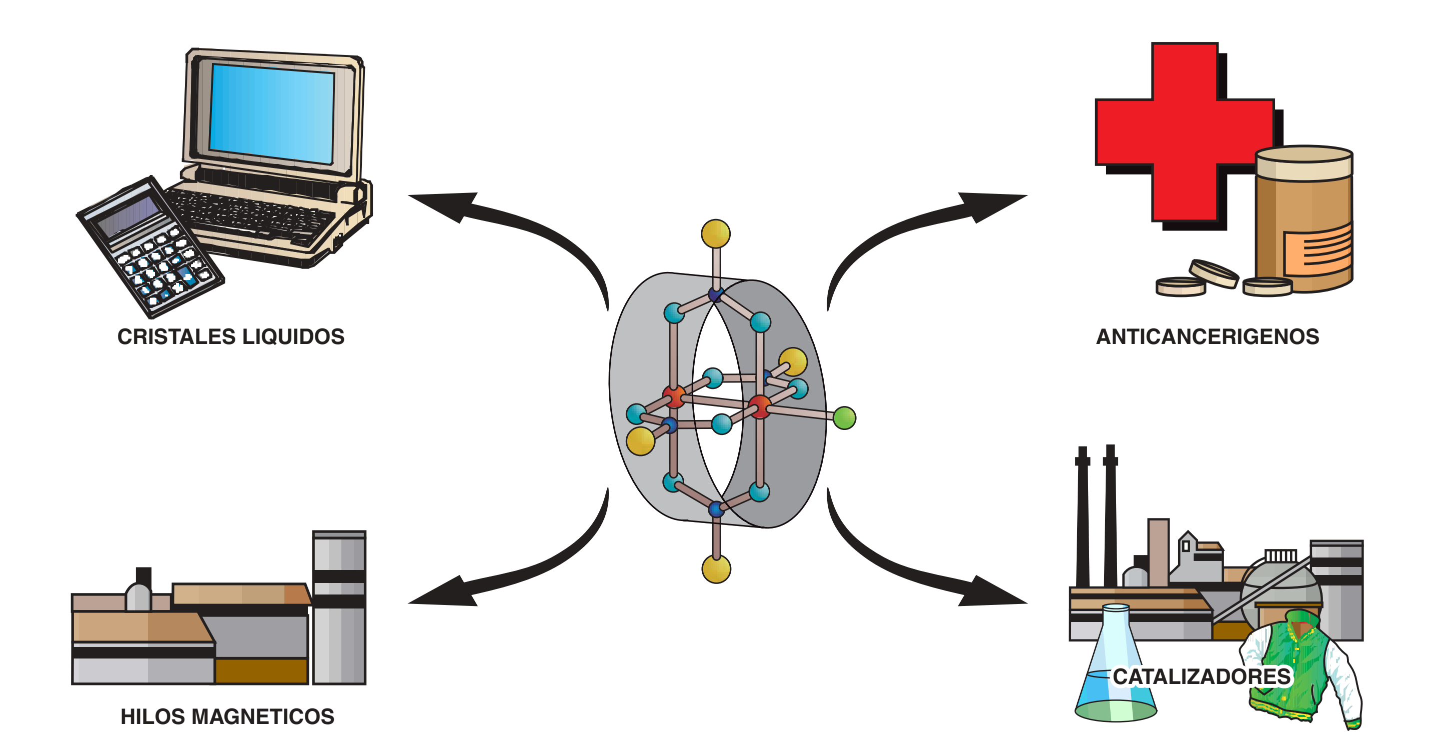
Hasta 1963 la función catalizadora se creía reservada a los complejos mononucleares. Se desconocía la capacidad de los metales que forman parte de un complejo para unirse a otros átomos metálicos dando enlaces metal-metal.

Una vez comprobado que los átomos metálicos de un complejo pueden utilizar otro átomo metálico para ocupar una de sus posiciones de coordinación y, por tanto, formar enlaces metal-metal, nació un área nueva dentro de la química que ha experimentado un rápido desarrollo. La idea de Chisholm sobre la reactividad de los compuestos dinucleares resultó ser cierta.

De todos los compuestos dinucleares, los que poseen dos átomos de rutenio enlazados por cuatro ligandos aniónicos mononegativos disfrutan de una serie de características que les hacen singulares. En general, los compuestos dinucleares son más estables cuando el valor del orden de enlace, o "número" de enlaces, entre los átomos metálicos que lo componen corresponde a valores enteros.

Ahora bien, en el caso de los compuestos de dirrutenio la especie más estable es aquella en la que el orden de enlace es fraccionario, en concreto de 2,5, lo que constituye una incógnita no resuelta todavía. La presencia de dos átomos de rutenio unidos por un fuerte enlace metal-metal produce una distribución electrónica que presenta tres electrones "solitarios" o desapareados. Por mor de esta distribución electrónica, se produce un orden de enlace metal-metal fraccionario y un estado de oxidación también fraccionario.

Aunque menos estables, hay también compuestos de dirrutenio cuyo orden de enlace es dos o tres y el número de electrones desapareados varía de cero a dos. Estos compuestos



poseen una estructura de tipo "linterna" o "paletas de barco de vapor", es decir, una especie de cilindro en el que los dos átomos metálicos quedan protegidos por todos los lados excepto por los extremos del mismo. Así, las propiedades y las aplicaciones de esta clase de compuestos vienen en gran parte determinadas por la falta de protección en los extremos del cilindro o por las ramificaciones que pueden salir del mismo aportadas por los ligandos.

Cuando los ligandos poseen largas cadenas (ramificaciones que salen del cilindro), éstas obligan a que los cilindros se ordenen en estado sólido de una manera determinada. Si el sólido se calienta hasta conseguir cierta fluidez, las cadenas laterales determinan que los cilindros mantengan un orden hasta que se llega al punto de fusión donde el desorden aumenta bruscamente.

El estado intermedio entre el sólido y el líquido, en el que persiste todavía un alto orden, se denomina mesofase; lo presentan las sustancias llamadas cristales líquidos. Aunque esta aplicación en los compuestos de dirrutenio todavía se encuentra en vías de desarrollo, se conocen ya ejemplos claros dotados de dicha propiedad.

La fuerte deslocalización electrónica que hay dentro de la unidad de dirrutenio (cilindro) puede extenderse, si entre los cilindros se colocan ligandos adecuados. Así, con cloro, pirazina u otros ligandos similares, la deslocalización electrónica se extiende a lo largo de una dimensión, dando lugar a compuestos que revisten interés técnico. Configuran los "hilos magnéticos moleculares", aplicados a materiales magnéticos, ópticos y electrónicos de muy diversa suerte.

Los compuestos dinucleares de rutenio poseen una o dos de las posiciones axiales (extremos del cilindro) vacantes, u ocupadas, por ligandos que pueden coordinarse, o abandonar la posición de coordinación, fácilmente.

La presencia de vacantes coordinativas es una condición que deben cumplir todas las sustancias que se usan como catalizadores. Si a esta peculiaridad se añade la elevada deslocalización electrónica que existe en la unidad de dirrutenio, se comprende el futuro prometedor de estos compuestos en el campo de la catálisis.

Se ha comprobado que, además, pueden operar como anticancerígenos, aunque, por ahora, su actividad y aplicabilidad ha estado limitada por su escasa solubilidad en medio acuoso. Se sabe, no obstante, que ciertos compuestos de dirrutenio se muestran muy solubles en disolventes orgánicos y en agua, lo que abre un camino a futuras investigaciones.

El estudio de los compuestos de dirrutenio que permita dar una explicación completa a la estabilidad de las unidades con diferentes estados de oxidación y al resto de las propiedades de estos compuestos supone, desde el punto de vista del químico, un apasionante desafío.

M. C. BARRAL, R. JIMÉNEZ APARICIO,
J. L. PRIEGO, E. C. ROYER
y F. A. URBANOS
Dpto. de Química Inorgánica.
Facultad de Ciencias Químicas.
Universidad Complutense

Frataxina

Estructura y función

Las enfermedades neurodegenerativas progresivas, acompañadas por lo común de una grave deficiencia física, suelen acabar en un desenlace fatal. Es harto habitual que, en tales patologías, las neuronas afectadas coincidan con las que presentan largos axones que recorren la médula espinal.

Los cuerpos neuronales de los axones más largos se alojan en los ganglios dorsales posteriores. Por estas neuronas comienza su labor agresiva la ataxia de Friedreich (FRDA), una enfermedad neurodegenerativa progresiva de herencia autosómica recesiva. La neurodegeneración en esta ataxia hereditaria, la más frecuente en la población de origen europeo, afecta también a las neuronas de las vías espinocerebelosa y corticospinal. Entre las complicaciones asociadas a la FRDA

se citan una cardiomegalia y un mayor riesgo de diabetes.

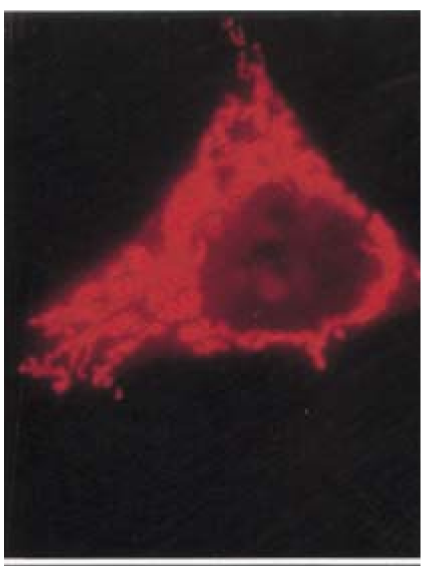
La causa frecuente de la ataxia de Friedreich consiste en una expansión del triplete GAA del primer intrón del gen que determina la frataxina. Hasta un 95 % de los pacientes son homozigotos para la expansión; el 5 % restante son heterozigotos: presentan expansión en un alelo y mutación puntual en el otro.

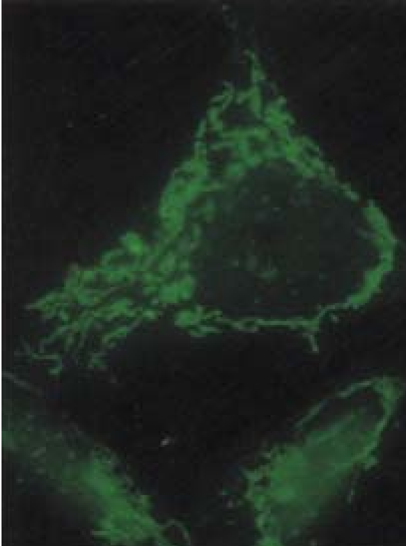
Por mermar la expresión del gen FRDA, la expansión del trinucleótido GAA desencadena la enfermedad. Así pues, la ataxia de Friedreich resulta de una deficiencia de frataxina. Se han hallado pruebas en ARNm y proteínas. Las personas con FRDA presentan una merma importante de la concentración de ARNm maduro determinante de la frataxina, si lo cotejamos con sujetos normales. Los análisis proteínicos de muestras de sistema nervioso central, líneas linfocitarias y músculo esquelético confirman el bajón notable en frataxina. La banda de 18 kilodalton detectada por los anticuerpos antifrataxina aparece muy débil en los pacientes, señal de una caída notable de ARNm. Esa gradualidad en el contenido de frataxina aporta, además, las bases biológicas para establecer una correlación entre la magnitud de la expansión y las variaciones fenotípicas de la enfermedad.

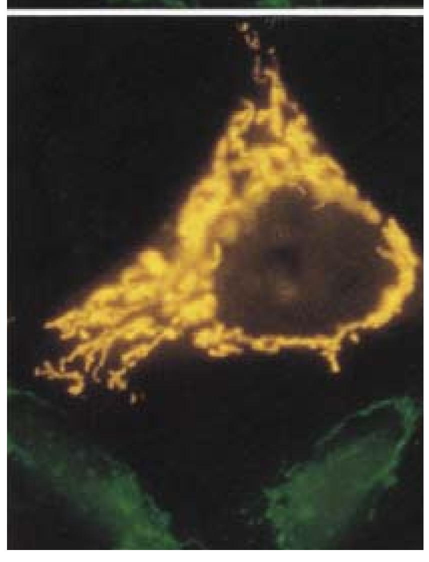
La frataxina, una proteína integrada por 210 aminoácidos, no presenta homología con ninguna otra de función conocida. Ello no obsta para que se haya descubierto proteínas similares en especies muy dispares: el ratón, el gusano *C. elegans* y la levadura *S. cerevisiae*. El homólogo más distante lo observamos en las bacterias gramnegativas, de las cuales derivan las mitocondrias a partir de un ancestral proceso de simbiosis.

En el marco de la hipótesis de la simbiosis entre bacterias, hemos de entender que la frataxina sea una proteína mitocondrial. En ese orgánulo reside la frataxina humana y su homólogo en la levadura, como ha quedado demostrado mediante experimentos de coincidencia ("colocalización") con marcadores mitocondriales.

El fraccionamiento del gen homólogo de la levadura constituye una vía eficaz para analizar su función, que puede haberse mantenido casi inalterada a lo largo de la evolución. Según han observado tres grupos independientes, la deleción del gen homólogo de la levadura origina un fenotipo de deficiencia respiratoria (petite). Que estos mutantes son hipersensibles al estrés oxidativo lo demuestra su mayor sensibilidad al H_2O_2, al hierro y al cobre. A propósito del hierro, por ejemplo, se ha encontrado una concentración del mismo en las mitocondrias de los mutantes que decuplicaba la concentración medida en el tipo silvestre. La hipersensibilidad de los mutantes al estrés oxidativo sería, en este caso, una consecuencia de la reacción de Fenton, debida a la acumulación de hierro en la mitocondria.







Localización mitocondrial de la frataxina. La frataxina, en rojo, coincide con la proteína mitocondrial, en verde, como demuestra la perfecta superposición de las dos fluorescencias, en amarillo

Si la función de la frataxina humana es semejante a la que la proteína cumple en la levadura, podría darse una acumulación de hierro mitocondrial y un deterioro oxidativo en las células de los pacientes con ataxia de Friedreich. La neurodegeneración que cursa en FRDA podría deberse al deterioro oxidativo y a la privación energética allí donde más se necesita, en los largos axones, ricos en mitocondrias.

¿Qué pruebas tenemos de que en la ataxia de Friedreich se produce acumulación de hierro y deterioro oxidativo? La acumulación de hierro se ha registrado en el corazón de los pacientes, aunque todavía no se ha observado en el sistema nervioso central.

En un principio se propuso que la FRDA comportaba varias anomalías mitocondriales. Pero no hubo ninguna que se corroborara en todos los pacientes. Tales estudios se limitaban al análisis de tejidos (hígado, fibroblastos, músculo) que no presentan signos patológicos, a pesar de su gran cantidad en mitocondrias y la expresión de frataxina.

Hace poco, sin embargo, un grupo francés puso de manifiesto la existencia de cierta deficiencia de la cadena respiratoria que se mostraba sólo en tejidos dañados por la enfermedad de FRDA. Esta deficiencia afecta a los complejos respiratorios, I, II y III, así como a las aconitasas citosólica y mitocondrial. Todas esas enzimas comparten en su centro activo un núcleo Fe-S, cuya inactivación constituye una prueba directa del estrés oxidativo; en efecto, las proteínas con núcleos Fe-S son sensibles a los radicales libres.

Puesto que no es tarea fácil realizar en humanos análisis bioquímicos más exhaustivos en el corazón y ganglios dorsales posteriores, los tejidos apropiados, resultaría muy pertinente un modelo animal de FRDA para entender la función de la frataxina y las consecuencias patológicas de su deficiencia. Dispuestos a recoger ese guante, hay varios grupos de inves-

tigadores trabajando en la búsqueda de las proteínas que interaccionan con la frataxina y en el desarrollo de modelos de ratón deficientes en frataxina. Para los pacientes y sus familias, la posibilidad del desarrollo de un tratamiento racional puede convertirse en un deseo legítimo.

VICTORIA CAMPUZANO
Centro Nac. de Investigaciones
Oncológicas Carlos III, Madrid

Agujero negro

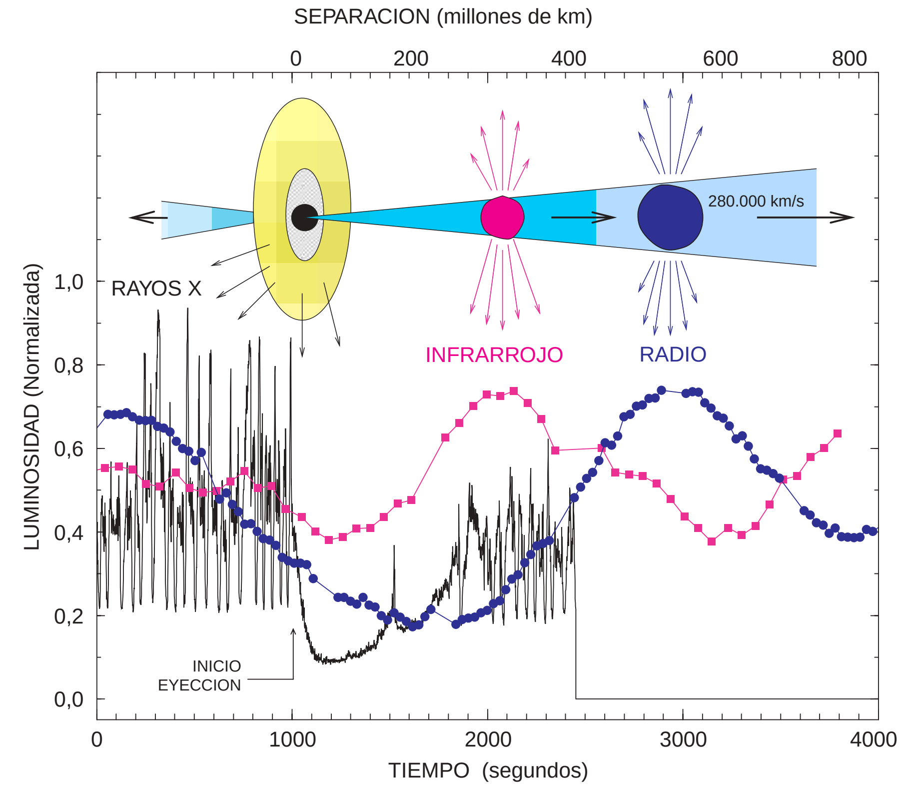
Fases de su vida

En 1992, el satélite *Granat* descubría una fuente de rayos X muy energéticos. Se le puso el nombre GRS 1915+105. Situada a 40.000 años luz, se trata de un sistema estelar doble, representante de la familia de los microcuásares. Estos novedosos astros, pertenecientes a nuestra propia galaxia, constituyen una versión cercana y miniaturizada de los cuásares y núcleos de galaxias activas de los confines del universo; diferencias de escala al margen, comparten con ellos física y morfología.

El interior de GRS 1915+105 alberga sin duda un agujero negro, cuya masa multiplica varias veces la del Sol. No obstante, queda muy lejos de los miles de millones de masas solares que alcanza la masa de los agujeros negros de cuásares remotos. Otro motivo más para llamarlo microcuásar.

Un agujero negro es una singularidad del espacio-tiempo predicha por la teoría de la relatividad y rodeada por un horizonte que la aísla del mundo exterior. Este horizonte viene a ser una frontera inmaterial, infranqueable a todo cuanto encierra, aun cuando se pretenda salir a la propia velocidad de la luz (300.000 km s^{-1}). En torno al agujero negro de GRS 1915+105 gravita un disco de acreción formado de materia arrancada a su estrella compañera. El disco, que se encuentra a temperatura altísima, emite fundamentalmente en rayos X. Buena parte de la materia del disco, atraída por la fuerza de la gravedad, desaparece inexorablemente tras el horizonte del agujero negro.

El tiempo que dura la evolución dinámica de la materia en el disco de acreción es directamente proporcional a la masa del agujero negro. Eso significa que los fenómenos dependientes del disco procederán en un microcuásar con celeridad muchísimo mayor que en un cuásar normal. Tal es el grado de aceleración de la película de los acontecimientos, que los sucesos que tardarían miles de años en un cuásar ordinario se desarrollan en cuestión de minutos en un microcuásar.



Curvas de luz en rayos X, infrarrojo y radio del microcuásar GRS 1915+105 durante un episodio de desaparición del disco de acreción y eyección posterior de nubes de plasma relativista. Este ocurrió el nueve de septiembre de 1997. La caída brusca de la emisión X que desencadena la eyección tiene lugar hacia el segundo 1000 desde el instante inicial. El gráfico superior ilustra la correspondencia entre la expansión de las nubes de plasma y la evolución progresiva de las curvas de luz a medida que éstas se alejan. La ausencia al final de datos X se debe a la ocultación de GRS 1915+105 por la Tierra, visto desde el satélite RXTE

Nuestro grupo de investigación ha emprendido varias campañas de observación de GRS 1915+105, para conocer su comportamiento y evolución temporal. En cada una de estas campañas, se ha observado con instrumentos que operan en diversas longitudes de onda del espectro electromagnético. Así, las emisiones de rayos X se siguieron con el satélite *Explorador Rossi de Temporización de Rayos X* (RXTE) en la banda de 2 a 60 kiloelectronvolt. La radiación infrarroja a 2,2 micrometros se estudió con el *Telescopio de Infrarrojos Británico* (UKIRT) desde Hawai. Por último, las radioemisiones de GRS 1915+105 a 3,6 cm se detectaron mediante las 27 antenas parabólicas del interferómetro *Gran Despliegue* (VLA), en el desierto de Nuevo México. En este trabajo de observación han participado, además de los que suscriben, otros científicos de EE.UU. y México.

Los datos de la campaña de septiembre de 1997, mostrados en la figura, han arrojado resultados reveladores. La caída inicial de la emisión de rayos X se vincula con la desaparición de porciones internas del disco de acreción, absorbidas por el agujero negro. Casi simultáneamente al descenso de los rayos X, y en apenas unos minutos, la emisión infrarroja aumenta de forma muy significativa. Idéntico comportamiento seguirá también la emisión radio, si bien unos minutos más tarde.

El comportamiento descrito se debe a la eyección de nubes de plasma relativista en forma de chorros colimados. Estas condensaciones alcanzan en su viaje velocidades próximas a

la de la luz. Su masa respectiva la hemos estimado en algo superior a la del monte Everest. Sin duda ésta proviene de parte del disco de acreción destruido, que ha sido acelerada hacia el exterior en vez de capturada por el agujero negro.

Los electrones relativistas de las nubes de plasma emiten radiación de tipo sincrotrón, que se va detectando progresivamente a longitudes de onda cada vez más largas conforme éstos pierden energía y el plasma se aleja diluyéndose. El desfase observado entre el máximo de luminosidad radio e infrarrojo constituye la prueba de tal dilución progresiva.

Al final del proceso, la emisión de rayos X se ha recuperado ya por completo, señal de que el disco de acreción se regenera otra vez con materia nueva procedente de la estrella donante. A partir de aquí, el ciclo se volverá a iterar con una asombrosa periodicidad de un episodio cada media hora.

En GRS 1915+105 se ha logrado, pues, la primera observación directa de las fases de la agitada vida de un agujero negro junto a su estrella compañera, con destrucciones y creaciones sucesivas del disco de acreción acompañadas de eyecciones de plasma altamente relativista.

JOSEP MARTÍ RIBAS
Universidad de Jaén

SYLVAIN CHATY
CESR de Toulousse

FÉLIX MIRABEL
Servicio de Astrofísica,
CE-Saclay

Sistema nervioso

Segmentación

El romboencéfalo ocupa la parte posterior del cerebro, entre el cerebelo y el inicio de la médula espinal. En él se originan los pares de nervios craneofaciales y se sitúan los centros de coordinación respiratoria y de respuestas reflejas, como los movimientos de huida.

Durante el desarrollo embrionario, el romboencéfalo se subdivide en una serie de rombómeros, abultamientos cuya morfología característica sólo se percibe en un breve período del desarrollo. Los rombómeros son estancos; es decir, las células de un linaje permanecen en su compartimento y no cruzan los límites de rombómeros adyacentes.

El romboencéfalo es una de las pocas estructuras segmentadas del embrión de los vertebrados, aparte del mesodermo somítico. Encierra, pues, un obvio interés para el estudio de los mecanismos de segmentación en vertebrados. Permite, además, la comparación con la segmentación en otros organismos, como los artrópodos.

El estudio evolutivo y comparado del control genético del desarrollo ha sido uno de los campos donde más se ha avanzado en los últimos años. El modelo de la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*) sirvió para identificar genes cruciales en el desarrollo de los patrones morfológicos de las primeras etapas del embrión. Se observó, luego, que muchos genes de éstos persistían conservados, a lo largo de la evolución, en otros grupos animales, reteniendo su estructura y función.

El ejemplo paradigmático del fenómeno nos lo ofrecen los genes *hox*, descritos primero en *Drosophila*. En la mosca, ocho genes se agrupan en el cromosoma y forman un complejo, cuya función consiste en establecer la identidad de los segmentos del tórax y abdomen a lo largo del eje antero-posterior.

En comparación, los mamíferos poseen 39 genes *hox* agrupados en cuatro complejos. Se originaron por duplicación y divergencia a partir del antecesor común de vertebrados e invertebrados que, se presume, portaba un solo complejo *Hox*. Lo mismo que en *Drosophila*, los genes *hox* de vertebrados intervienen en la especificación de la identidad segmentaria, tanto del romboencéfalo como de la columna vertebral.

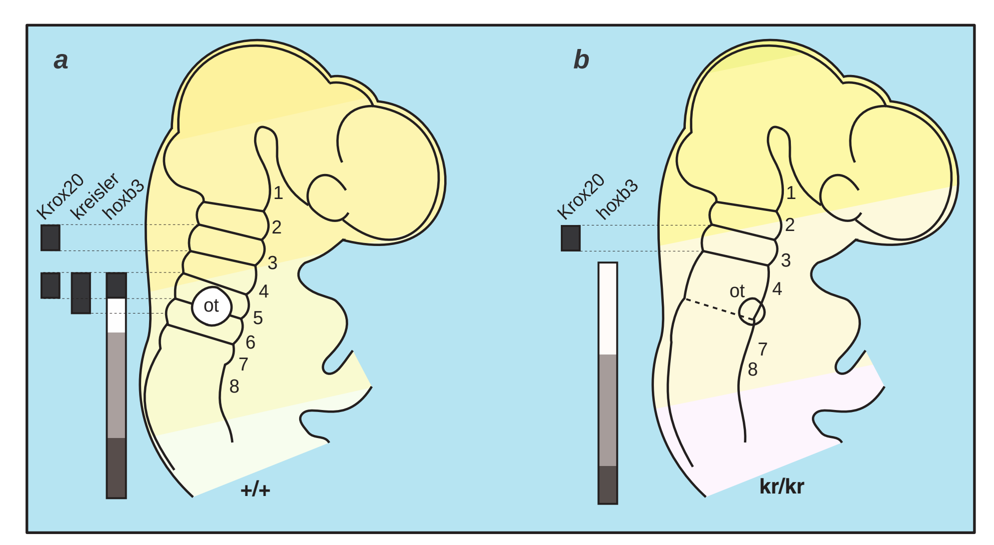
En el laboratorio de Robb Krumlauf, del Instituto MRC de Investigaciones Médicas de Londres, hemos abordado la función y regulación del complejo *HoxB*. Nos hemos centrado en la segmentación del sistema nervioso de mamíferos. Los cuatro primeros genes de este complejo se expresan en el romboencéfalo y lo hacen con una intensidad variable según el rombómero en cuestión: *hoxb1* en el rombómero (r) 4; *hoxb2* en r3, r4 y r5; *hoxb3* en r5; y *hoxb4* en r7, r8 y la parte anterior de la médula espinal.

Aunque hay otras familias de genes que se expresan segmentariamente en el romboencéfalo, su forma de interacción con los genes *hox* no ha quedado todavía determinada. El único caso estudiado es el de la proteína con dedos de cinc Krox20 que se expresa en r3 y r5 y es un regulador directo de la expresión de *hoxa2* y *hoxb2* en estos rombómeros.

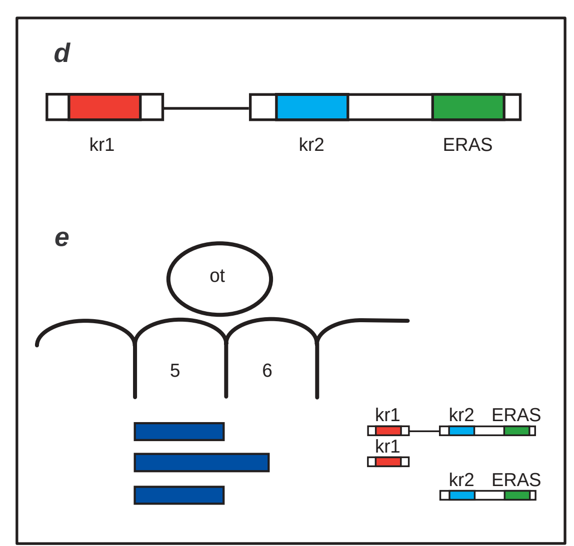
Se conocen muy pocos mutantes de ratón con defectos en la segmentación del sistema nervioso. La mutación *kreisler*, inducida por rayos X, fue descrita por Paul Hertwig en 1944 y M. S. Deol caracterizó su fenotipo embrionario en los años sesenta. Los ratones homozigotos presentan defectos vestibulares del oído interno y dan vueltas sobre sí mismos. El defecto de la vesícula ótica puede atribuirse a fallos sobrevenidos en el desarrollo del romboencéfalo, que desembocan en una vesícula más pequeña y desplazada lateralmente. La investigación ulterior con marcadores moleculares ha sacado a la luz la alteración experimentada por los genes *Krox20* y algunos genes *hox*, que en condiciones normales se expresan en r5 y r6. El resultado final tenía que ser que el mutante naciera sin rombómeros 5 y 6. La hipótesis se confirmó cuando se identificó el gen responsable de la mutación, al ser un factor de transcripción de la familia b-zip (dominio básico-cremallera de leucina) expresado en r5 y la parte anterior de r6 en fases muy tempranas del desarrollo.

Con el fin de conocer las relaciones entre *kreisler* y los genes *hox* decidimos analizar la regulación transcripcional del gen *hoxb3*. Este se expresa, durante el inicio del desarrollo, en niveles altos en r5 y en niveles menores en rombómeros posteriores y la médula espinal. La expresión de *hoxb3* en embriones *kreisler* sólo se ve afectada por la desaparición del dominio de alta expresión en r5. En razón de todo ello, *hoxb3* se erige en candidato idóneo para ser regulado por *kreisler*, aunque no es suficiente para saber si se trata de una interacción directa o indirecta.

La técnica experimental empleada consistía en caracterizar elementos de ADN genómico en el locus de *hoxb3* que ejercieran actividad reguladora en ratones transgénicos. Unimos fragmentos de ADN a un promotor heterólogo (el del gen de β-globina humano) y a un gen marcador fácil de detectar (el gen de *lacZ* bacteriano, que con una simple tinción histoquímica para β-galactosidasa origina un precipitado azul). Tal es el método habitual seguido para analizar la actividad de distintos







El recuadro superior (a, b) *muestra la organización del romboencéfalo y la expresión génica en embriones de 9,5 días normales* (a, +/+) *y mutantes homozigotos kreisler* (b, *kr/kr*). *En el romboencéfalo del mutante faltan los rombómeros* (r) *5 y 6 y la vesícula ótica* (ot) *es más pequeña y está desplazada lateralmente. También desaparece la banda de expresión de Krox20 en r5 y el dominio del alta expresión en r5 de hoxb3. En* c, *se ilustra un ejemplo de un embrión transgénico para un fragmento de 5 kb del locus de hoxb3 de pollo, donde se aprecia tinción fuerte en r5 y también en el mesodermo lateral posterior. Se aporta en* d *un esquema del elemento regulador de r5 de hoxb3 formado por dos sitios de unión para la proteína kreisler (kr1 y kr2) y un sitio de activación relacionado con proteínas de la familia Ets (ERAS). En* e, *se esquematizan el romboencéfalo y los patrones de expresión producidos por distintas combinaciones de los sitios de unión presentes en el elemento de r5 de hoxb3. El sitio kr1 por sí solo produce un patrón de expresión igual al del gen kreisler, pero en el contexto normal su actividad se ve limitada a r5 por la acción de los sitios kr2 y ERAS*

fragmentos en embriones transgénicos, originados por microinyección de las construcciones en el pronúcleo de oocitos, con el propósito de recrear distintos aspectos de la expresión normal del gen.

En colaboración con el laboratorio de Mai Har Sham, de la Universidad de Hong Kong, se analizaron 30 kilobases (kb) del locus de *hoxb3* de ratón y 10 kb del gen de pollo, identificándose fragmentos de 650 pares de bases (pb) de ratón y 800 pb de pollo, aptos para dirigir la expresión de *lacZ* específicamente en r5.

Se recurrió a dos especies de vertebrados porque la conservación evolutiva de los elementos reguladores facilita la identificación de las secuencias de un fragmento cruciales para la correcta expresión génica. La comparación de las secuencias de ADN de los dos elementos específicos de r5 trajo a primer plano dos pequeños bloques de identidad (de 19 y 45 pb) donde había secuencias de unión (kr1 y kr2) para factores de transcripción de la misma familia que kreisler.

La profundización en el estudio (ensayos *in vitro* de unión de proteínas a ADN, realizados en colaboración con el laboratorio de Greg Barsh, de la Universidad de Stanford, así como ensayos de mutación de esos sitios de unión en las construcciones con *lacZ*) reveló con toda nitidez que la proteína kreisler se unía específicamente al elemento regulador de r5 de *hoxb3* y que estos sitios eran imprescindibles para la actividad transcripcional en ratones transgénicos.

Hubo más. Al analizar uno por uno la función de estos sitios surgió un nuevo nivel de regulación. El sitio kr1 está capacitado para producir un patrón idéntico al gen *kreisler* endógeno (r5 y la mitad anterior de r6), lo que indica que está bajo su control directo. En cambio, el sitio kr2 por sí solo carece de actividad; ahora bien, si se le unen secuencias extra, genera un patrón limitado a r5. En estas nuevas secuencias se identificó un posible sitio de unión para factores de transcripción de la familia Ets, cuya mutación anula la actividad en r5. El posible papel de esta proteína sería el de modular la activación de *hoxb3* por *kreisler* para que ocurra exclusivamente en r5 y no se extienda a la mitad anterior de r6.

Llegamos de esa forma a la conclusión de que *kreisler* es un gen que se halla por encima de los genes *hox* en la cascada génica que lleva a la determinación de la identidad de regiones del cerebro posterior de los vertebrados.

MIGUEL MANZANARES
División de Neurobiología
del Desarrollo
Instituto de Investigaciones
Médicas MRC
Londres, UK

DE CERCA

Texto y fotos: Josep M.ª Gili y Marta Ribes

En busca de la luz

Entre las sorpresas que los arrecifes guardan al buceador no es pequeña la de observar el crecimiento de los corales hacia la superficie cual si ansiaran contemplar el mundo exterior. La verdad es que lo que buscan es la luz, de igual manera que hacen las plantas terrestres. En los tejidos de los corales residen buena parte de los productores primarios del arrecife, las zooxantelas, algas unicelulares que viven en simbiosis con los corales.

Los corales reciben de las algas, mediante traslocación, la mayor parte del carbono que les permite respirar y crecer. Se les reconoce una alimentación de tipo autotrófico, completada con una dieta heterotrófica de presas planctónicas. Las algas aprovechan los desechos de la digestión de las presas planctónicas por parte de los pólipos del coral al extraer del medio extracelular los nutrientes que necesitan para duplicarse. Se opera, pues, una relación simbiótica entre coral y alga de tal eficacia, que apenas ha cambiado en el curso de la evolución.

Las colonias de corales, al crecer hacia arriba, ofrecen la máxima superficie posible a la luz. Esa orientación en su desarrollo confiere cierta fragilidad a la parte apical del arrecife. Las corrientes y el oleaje rompen una y otra vez la comunidad coralina. Pero se trata de un desastre que resulta vital para el arrecife, pues los restos de las colonias de coral muerto se desmenuzan en arena muy fina que cementa el resto del arrecife.



1. Arrecife de coral. Las colonias de Acropora hyacynthus *crean grandes abanicos orientados hacia la superficie*



2. Colonias de diversas especies de corales. Siguen pautas de crecimiento distintas y ofrecen riqueza morfológica al arrecife



3. Colonias de Acropora rubusta. *Crecen en forma de digitaciones y cuernos cerca de la superficie*



4. Detalle (macrofotografía) *de una colonia de* Galaxea. *Los pólipos presentan un color verdoso, fruto de la acumulación de zooxantelas*



5. Detalle (fotografía al microscopio electrónico) *de zooxantelas instaladas en la cavidad gástrica de un coral*

EL DRAGON DE KOMODO

En islas e islotes del archipiélago indonesio, reina soberano el mayor lagarto del mundo

Claudio Ciofi



Un ciervo deambula ligero por la senda que se abre a través de la sabana, muy crecida. Es un macho adulto de *Cervus timorensis*. Pesa unos 90 kilogramos. También llamado ciervo rusa, el animal conoce bien el camino. Acostumbran tomarlo muchos ciervos en busca de comida. Este rusa vive en la isla indonesia de Komodo, un pequeño eslabón de una cadena de islas que constituye la divisoria entre el mar de Flores y el océano Índico. Para la mayoría de los animales salvajes la supervivencia es una lucha; para los ciervos de Komodo, y de otras islas cercanas, la naturaleza afila la garra y se torna cruenta, a dentellada limpia. Hablamos del dragón que acecha a nuestro ciervo.

El dragón de Komodo hace justicia a los animales mitológicos y recibe diversas denominaciones. Se le llama monitor de Komodo, en cuanto miembro de los lagartos monitores, de la familia Varánidos, que en la actualidad cuenta con un solo género, *Varanus*. Los residentes de la isla de Komodo le conocen también por *ora*. En Komodo y en las islas de Rinca y Flores es *buaja darat* (cocodrilo terrestre), un nombre descriptivo aunque inexacto; los monitores no son crocodilios. Para otros se trata del *biawak raksasa* (monitor gigante), designación precisa: es el mayor de los lagartos monitores y, por tanto, el mayor lagarto de cualquier tipo de los que en la actualidad viven en el planeta. (El "monitor de Papúa", *Varanus salvadorii*, que habita en Nueva Guinea, puede ser más largo que el más largo de los dragones de Komodo. Pero el cuerpo esbelto y la larga cola del monitor de Papúa le alejan del potente y robusto dragón en cualquier estima razonable de tamaño.) Para los zoólogos, el dragón de Komodo es *Varanus komodoensis*.

El ciervo ha llegado hasta unos pocos metros de donde vigila un macho robusto de dragón de Komodo, que mide unos 2,5 metros de longitud y pesa 45 kilogramos. ¿Un tamaño arquetípico? El mayor ejemplar comprobado alcanzó los 3,13 metros y pesó 166 kilogramos, quizá porque portaba todavía una cantidad sustancial de comida sin digerir. Más habituales son, para los mayores dragones salvajes, los pesos que giran en torno a los 70 kilogramos. A menudo, los animales están sobrealimentados en cautividad. Aunque el dragón de Komodo puede correr por breves minutos a velocidades de hasta 20 kilómetros por hora, su estrategia de caza se basa en el acecho y la potencia. Se ha pasado horas allí, a la espera de un ciervo, jabalí, cabra o cualquier animal de tamaño adecuado y nutritivo.

Los monitores pueden distinguir objetos distantes 300 metros. La visión cumple una función en su estrategia de caza. Sus ojos perciben mejor el movimiento que



1. EL DRAGON DE KOMODO saca su lengua amarilla y bífida, de más de 30 centímetros de longitud, para saborear el aire.



2. LA ISLA DE KOMODO, muy escarpada, se extiende en una superficie de unos 340 kilómetros cuadrados. Las cumbres más altas se alzan unos 735 metros sobre el nivel del mar. Aunque los dragones de Komodo prefieren deambular por debajo de los 500 metros, puede hallárseles en cualquier altitud. Medran en algunas islas indonesias. Australia se encuentra a unos 900 kilómetros al sudeste, Java a unos 500 kilómetros al oeste y Nueva Guinea a 1500 kilómetros al nordeste.



identifican objetos fijos. La retina sólo tiene conos; por tanto, aunque capacitados para distinguir los colores, ven muy poco en luz mortecina. La hierba está ya muy alta y tapa al ciervo.

No debería hacer mucho ruido nuestro mamífero si quiere pasar inadvertido para el dragón de Komodo. Contra la sospecha manifestada en el artículo que descubrió su existencia, el reptil no es sordo. La investigación posterior reveló la falsedad de semejante opinión. Cierto es, sin embargo, que sólo oye en una gama reducida, quizás entre los 400 y los 2000 hertz, aproximadamente. (El intervalo de frecuencias del hombre se halla entre los 20 y los 20.000 hertz.) Esta limitación se debe a que los Varánidos disponen de un solo hueso, el estapedio, para transmitir vibraciones de la membrana timpánica a la cóclea, la estructura responsable de la percepción del sonido en el oído interno. Para amplificar el sonido y transmitir bien las vibraciones los mamíferos tienen otros dos huesos que operan con el estapedio. Además, la cóclea de los Varánidos, pese a ser la más avanzada entre los lagartos, consta de muchas menos células receptoras que la de los mamíferos. Estamos, pues, ante un animal que no oye ni una voz de timbre bajo ni un grito agudo.

CLAUDIO CIOFI estudió biología en la Universidad de Florencia. Tras doctorarse por la Universidad de Kent en Canterbury fue contratado por la Sociedad Zoológica de Londres. Esta ha financiado el programa explicado en el artículo, proyecto de campo y laboratorio para cuyo desarrollo ha contado con otras numerosas ayudas, académicas, sociales y financieras.

Sin descartar la utilidad de la vista y el oído, el dragón de Komodo encuentra en el sentido del olfato su principal detector de comida. Saca su lengua amarilla, larga y bífida, para percibir el aire. Las dos puntas de la lengua se retraen luego, hasta el techo de la boca, para estimular los órganos de Jacobson. Estos analizadores químicos "huelen" al ciervo en las moléculas aerotransportadas. La concentración de la punta izquierda de la lengua es superior a la que muestreó la punta derecha: el ciervo, infiere el varano, se está acercando por la izquierda. Merced a ese mecanismo y a su deambular ondulatorio cabeceando de un lado para otro, el dragón siente la presencia y dirección de carroña odorífera desde una distancia de cuatro kilómetros, con viento favorable.

El dragón de Komodo, sanguinario y resuelto, se deja oír cuando está a un metro de su víctima. El movimiento raudo de sus pies emite el sonido de una "ametralladora apagada", en imagen de Walter Auffenberg, quien más lejos ha llegado en el conocimiento de estos varanos. Auffenberg, herpetólogo de la Universidad de Florida, vivió en el campo un año casi entero a finales de los sesenta y volvió por períodos más breves en 1971 y 1972. "Cuando estos animales deciden atacar, no hay nada que pueda detenerlos", apuntaba. Nada que pueda detenerlos de su intento, se supone. La mayoría de los ataques de los depredadores, en todo el mundo, acaban en fracaso. Aunque la espesura de la vegetación dificulte la observación de depredadores grandes y algunos registros cuantitativos resulten, por ende, meras aproximaciones, podemos ilustrar el fiasco con la experiencia de Auffenberg. Siguió éste a un dragón de Komodo durante 81 días; en ese intervalo, sólo realizó dos capturas con éxito; no se sabe del número de intentos fallidos.

Pero aceptemos que el dragón cae sobre nuestro ciervo. Ataca primero a las patas, desequilibrándolo con el golpe. Si la presa hubiera sido otro animal menor no hubiera dudado en tirarse al cuello. La estrategia básica es sencilla: hacer caer a la víctima para luego despedazarla. Con su tensa musculatura que mueve poderosas mandíbulas consigue parte del objetivo; la otra la cumplen sus dientes, el arma más peligrosa. Son grandes, curvos y aserrados. Desgarran la carne como el arado abre el surco.

En la endentadura quedan restos de carne de su última comida, ya fuera una presa viva o carroña. Esos pedazos, ricos en proteínas, contienen bacterias en abundancia, objeto de investigación ahora por Putra Sastrawan, discípula de Auffenberg, y sus colegas de la Universidad de Udayana en Bali, y por Don Gillespie,



3. JUVENIL en su abrigo arbóreo, donde pasa mucho tiempo a resguardo de los miembros mayores y menos ágiles de su especie.

del Zoo de El Paso, en Texas. Han encontrado unas 50 cepas diferentes de bacterias en la saliva; siete al menos, muy sépticas.

Si el ciervo lograra liberarse y escapar a la muerte en la lucha, será una victoria pírrica, tan corta como su vida. Las infecciones que le causará la mordedura del dragón lo matarán probablemente en una semana; y servirá de alimento para su depredador o, más seguro, para otros dragones, pues la mordedura de un dragón de Komodo no es letal para otro. Según parece, los dragones heridos en peleas con camaradas no sufren la agresión de las bacterias que, en los demás casos, resultan mortales. Gillespie busca anticuerpos en la sangre del dragón de Komodo gracias a los cuales no corre el sino del ciervo infectado.

Pero si el ciervo queda inmovilizado, el dragón continuará desgarrando la presa. Una vez seguro de la incapacidad de ésta, gravemente herida y convulsionada, el lagarto puede tomarse un respiro. De repente, lanza su golpe de gracia: desgarra la panza. El ciervo muere exangüe y el reptil inicia su festín.

Los músculos poderosos de las mandíbulas y la garganta le permiten tragar grandes pedazos de carne con asombrosa rapidez. En cierta ocasión, Auffenberg observó una hembra de no más de 50 kilogramos acabar en un cuarto de hora con un jabalí de 31 kilos. Para engullir se ayuda de varias articulaciones móviles, como la charnela intramandibular que abre lo inimaginable la mandíbula inferior. Dilata el estómago para consumir hasta el 80 por ciento de su peso corporal en una pitanza, razón última de relatos exagerados sobre pesos de capturas.

Los leones y otros grandes mamíferos carnívoros tienden a despreciar del 25 al 30 por ciento de la presa. Rechazan intestinos, piel, esqueleto y pezuñas. Los dragones de Komodo aprovechan mejor el condumio, prescindiendo de un escuálido 12 por ciento. Comen huesos, pezuñas y tiras de pellejo; también los intestinos, pero luego de agitarlos vigorosamente para vaciar su contenido en heces. Puesto que los dragones grandes suelen comerse a los pequeños, no es infrecuente que los segundos se embadurnen en material fecal, despidiendo un olor desagradable para los mayores.

Iniciado el festín, pronto acuden otros dragones de Komodo, atraídos por los aromas. No es fácil distin-



4. UN DRAGON DE KOMODO dándose un festín con un ciervo (*debajo*). Los dientes curvos y aserrados (*derecha, dispuestos en la mandíbula*) tajan la carne. Los restos de comida que quedan retenidos en los intersticios de las endentaduras permiten el crecimiento de bacterias sépticas.



guir allí los machos de las hembras. Aquéllos suelen ser más robustos, pero no hay diferencias morfológicas manifiestas. Existe, sin embargo, una clave sutil, una pequeña divergencia en la disposición de las escamas frente a la cloaca, la cavidad que alberga los genitales en ambos sexos. Distinguir el sexo de los dragones, auténtico problema para los investigadores, no lo es por supuesto para ellos. Y con el grupo congregado en torno a la carroña, llega la oportunidad del cortejo.

La mayoría de los apareamientos coinciden entre mayo y agosto. Los machos dominantes no rehúyen el combate ritual por la hembra. Apalancados en la cola, luchan erguidos y se agarran unos a otros con sus patas anteriores mientras intentan tumbar al oponente. Hay derramamiento de sangre y el perdedor sale corriendo o se queda postrado e inmóvil.

El triunfador inicia el cortejo chasqueando su lengua sobre el hocico y cuerpo de la hembra, por ese orden. La sien y el pliegue entre el torso y la pata posterior son puntos favoritos. Se trata de una estimulación táctil y química a la vez, mediante secreciones de glándulas dérmicas. Antes de proceder a la cópula, el macho evagina un par de hemipenes situados dentro de su cloaca, en la base de la cola. Se arrastra sobre el dorso de la hembra en cuya cloaca inserta uno de los dos hemipenes, según su posición en relación a la cola de la compañera.

La hembra pondrá los huevos en septiembre. El retraso en la puesta podría obedecer a una necesidad de ahorrarles a los huevos los meses tórridos de la estación seca. Además, los huevos sin fecundar pueden disponer de una segunda oportunidad en un apareamiento posterior. La hembra pone los huevos en depresiones excavadas en laderas de colinas o dentro de los nidos expoliados de megápodos. Estas aves terrestres del tamaño de pollos de corral levantan montones de tierra mezclados con ramitas que alcanzan un metro de altura y tres de diámetro. Mientras transcurre la incubación, las hembras del dragón se tienden en los nidos, protegiendo a su descendencia. No hay pruebas de que los machos se cuiden de los hijos eclosionados.

Los recién nacidos no alcanzan los 100 gramos, con una longitud media de 40 centímetros. En sus primeros años corren verdadero peligro, víctimas fáciles de los depredadores, incluidos sus parientes dragones. No son restrictivos en la dieta, pues comen insectos, lagartijas, serpientes y aves. A los cinco años, pesan ya 25 kilogramos y miden dos metros de largo. Para entonces cobran piezas mayores: roedores, monos, cabras, jabalíes y, sobre todo, ciervos. No paran de crecer, ahora lentamente, a lo largo del resto de su vida, que puede durar más de 30 años. Los mayores dragones de Komodo, de tres metros y 70 kilos de hueso, dientes y tendones, son amos y señores en sus minúsculos reinos insulares.

Estos dragones, miembros de la clase Reptiles, guardan relación taxonómica con los dinosaurios, pero no descienden de ellos. Los dragones de Komodo y los dinosaurios comparten un antepasado común. Lagartos monitores y dinosaurios pertenecen a la subclase Diápsidos, o “reptiles con dos arcos”, caracterizados por la presencia de dos aberturas en la región temporal del cráneo. Los primeros fósiles del grupo datan del final del período Carbonífero, hace unos 300 millones de años.

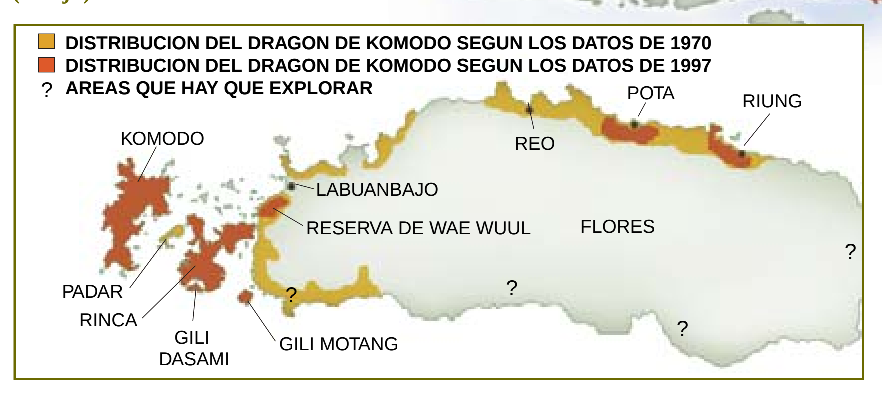
De estos antiguos representantes surgieron dos linajes distintos, el de los Arcosaurios y el de los Lepidosaurios. En los Arcosaurios se inscriben los dinosaurios. De los primitivos Lepidosaurios procede el antepasado de los lagartos monitores, a finales de la era Paleozoica, hace unos 250 millones de años. Hubo dinosaurios que desarrollaron posturas erectas. El linaje de los monitores, por contra, conservó su postura reptil y adquirió potentes patas anteriores para la locomoción. Durante el Cretácico, y desde hace 100 millones de años, aparecieron en Asia central especies emparentadas con los varánidos actuales. Algunos eran grandes lagartos marinos que se extinguieron con los dinosaurios, hace unos 65 millones de años. Otros eran formas terrestres, de hasta tres metros de longitud, que vivían de animales más pequeños y saqueaban seguramente los nidos de dinosaurios. Hace unos 50 millones de años, durante el Eoceno, estas especies se dispersaron por Europa, Asia meridional y Norteamérica.

Wolfgang Böhme, del Museo de Historia Natural de Bonn, ha investigado el auge y evolución del género *Varanus* a partir de la morfología comparada. Dennis King, del Museo de Australia Occidental, y el grupo encabezado por Peter Baverstock, de la Universidad de la Cruz del Sur, se han centrado en la trayectoria evolutiva del género mediante el cotejo de secuencias de ADN y de la estructura cromosómica en varánidos y familias emparentadas. A tenor de sus resultados, el género surgió hace entre 40 y 25 millones de años en Asia.

Los Varánidos llegaron a Australia hace unos 15 millones de años, tras el choque entre la masa continental australiana y Asia sudoriental. Numerosas especies de pequeños varánidos, llamadas monitores pigmeos, colonizaron Australia y ocuparon múltiples nichos ecológicos. Transcurridos dos millones y pico de años, se independizó una segunda estirpe, que se propagó por Australia y el archipiélago Indonesio, más cercano entonces a Australia, pues buena parte de la plataforma continental permanecía emergida. *V. komodoensis* pertenece a ese linaje, del que se separó hace unos cuatro millones de años.

Los varánidos indoaustralianos aprovecharían su entorno faunístico exclusivo. Las islas albergan menos recursos que las masas continentales. Puesto que los depredadores reptilianos pueden subsistir con unos requerimientos energéticos muy inferiores a los demandados por los mamíferos, el reptil sabrá en esas duras condiciones convertirse en último referente de la depredación.

Y en ese marco, los reptiles pueden adquirir un tamaño insólito, que les supone ventaja a la hora de cazar. *Megalania prisca* es un varánido que se extinguió hace unos 25.000 años. Pudo haber alcanzado una longitud de seis metros y un peso de 600 kilogramos. Su tardía desaparición sugiere que el hombre pudo conocer el monstruo. Más moderado es el gigantismo adoptado por los dragones de Komodo. ¿Por qué se encuentra confinado en esa mínima área de distribución la especie más pequeña de entre los grandes depredadores? Se



5. POSIBLES RUTAS (*derecha*) seguidas por los antepasados de los dragones de Komodo hasta su hábitat insular actual. Tema controvertido, no se sabe si llegaron directamente de Asia o lo hicieron primero a través de Java o Australia. Es seguro que los niveles más bajos del mar en el pasado abrieron más rutas que las ahora presumibles. La investigación más reciente en la región ha puesto al día un conocimiento del territorio actual de los dragones de Komodo (*debajo*).



6. EL AGUA DULCE es tan escasa durante la estación seca, que la mayoría de esos imponentes lagartos pasan sin ella desde abril a diciembre. Cuando hay agua disponible, los varanos acostumbran beber la que se acumula en las pozas hozadas por los jabalíes.

trabaja en la respuesta. Varios investigadores aceptan rutas alternativas que los antepasados de los dragones pudieron haber tomado hasta arribar a Komodo, Flores, Rinca, Gili Motang y Gili Dasami.

La paleogeografía de la isla de Komodo difiere de la que define a sus vecinas. Según se desprende de los cambios de nivel del mar en todo el mundo a lo largo de los últimos 80.000 años y de los datos batimétricos de la zona de estudio, Flores y Rinca persistieron unidas hasta hace 10.000 años. Gili Motang formó continuidad en varias ocasiones con su masa continental. Komodo, aislada durante mucho tiempo, pudo haber estado conectada a sus vecinas orientales hace unos 20.000 años, durante el último máximo glacial. Asociación que quizá se prolongó 4000 años. (Estas cifras y detalles del relieve se fundan en cálculos propios sobre el efecto de las variaciones del nivel del mar, del orden de 130 metros, durante la postrera glaciación del Pleistoceno, combinados con los datos batimétricos de que se dispone para la zona.)

El registro fósil, muy sugestivo, respalda la idea de que las poblaciones actuales de Komodo son relictas de una distribución más extensa que antaño llegó hasta Timor, al este de Flores. Los fósiles de dos formas idénticas de un elefante enano hoy extinguido, *Stegodon*, que medía alrededor de 1,5 metros en la cruz, y que se encuentran en Timor y en Flores, inducen a pensar que hubo cierta contigüidad entre estas dos islas en el Pleistoceno, hasta el punto de posibilitar la migración.

Los recursos limitados de una isla se encargarían de encauzar el curso evolutivo de los elefantes enanos. Se habrían seleccionado los individuos pequeños, con menores necesidades de alimento. En cambio, el dragón de Komodo actual pudo haberse desarrollado a partir de un antepasado menos imponente; la disponibilidad de elefantes pequeños entre sus presas pudo haber impulsado la selección del tamaño grande que resultó en los tres metros del moderno dragón de Komodo. (Un reptil grande sigue necesitando mucha menos comida que un mamífero de tamaño similar.) Auffenberg sugiere que, antaño, el dragón de Komodo pudo "haber sido un depredador muy especializado de estegodontes enanos", sin descartar que también hubiera presas del porte de ciervos y jabalíes antes de la llegada del hombre, en los últimos 40.000 años.

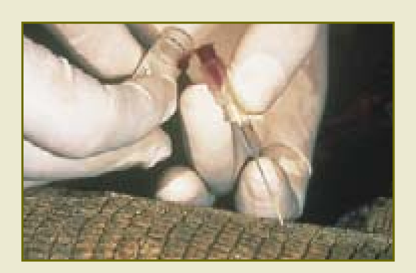
La reconstrucción de la historia evolutiva de los dragones de Komodo habrá de contar con un registro fósil más abundante y una datación precisa de las islas que albergan poblaciones vivientes. El trabajo de King y Baverstock, así como la integración de datos paleogeográficos y análisis genómico, arrojarán luz sobre el origen de esta especie.

Lo que da de sí una tesis doctoral

Me interesé por los dragones de Komodo cuando preparaba la tesis doctoral en la Universidad de Kent en Canterbury. El tema de grado escogido, biología de la conservación, me exigía una investigación de campo en torno a una especie rara o en peligro. Pensé en reptiles y combinaría, cavilé, el trabajo de campo con técnicas de biología molecular que permiten determinar los parentescos y lejanías genéticas entre poblaciones. Debía proveerme de sangre del ejemplar de estudio. Con esos parámetros, los animales idóneos se reducían a dos especies.

El primero era la tortuga mediterránea, *Testudo hermanni*, cuya área de distribución se extiende por Europa meridional. Pero me decidí por el dragón de Komodo. Era un reto. Además, seguía siendo uno de los grandes depredadores del mundo menos investigados. En el desarrollo de la tesis descubriría muchas de las razones de esa ignorancia persistente. Tenía que embarcar todos los materiales necesarios para el trabajo de campo o crearlos de la nada. La construcción de trampas para los dragones es un trabajo duro y lento. Aunque raros, los ataques contra humanos no son insólitos. Y después está el olor.

Yo quería trampas móviles y varanos inmovilizados. Armé trampas similares a las empleadas contra ratones, que no matan a los animales, sólo que mis "roedores" podían medir tres metros. Construí los dispositivos con madera local y malla de alambre de la utilizada para cercados. Cada trampa medía 3 metros por 0,5 metros por 0,5 metros y poseía una puerta que se podía cerrar. Una cabra servía de cebo y, a la vez, nos proporcionaba raciones a mí y a un guardabosque local que me auxiliaba. Los dragones de Komodo se introducían de lleno en la trampa para alcanzar la carne, aposentada en el otro extremo. Una vez rozaban el cebo, que estaba conectado a un mecanismo disparador, se cerraba la entrada a la trampa.







LUCHA CON EL DRAGON. El estudio comporta extraer muestras de sangre, colocarle un arnés caudal que porta instrumentos telemétricos y construir una trampa para su caza.

Colgábamos trampa, inquilino y presa en una balanza, para determinar el peso de la captura. Abríamos luego la puerta del extremo caudal y sacábamos al varano de la trampa. Ese lagarto despide un olor fétido, vinculado con las fábricas bacterianas que tiene en la boca y su frecuente asociación con la carroña. La carne de cabra putrefacta refuerza el mal olor; por si fuera poco, el dragón amenazado acostumbra vomitar y defecar, listo para la lucha o la huida. Cuando las patas posteriores quedaban libres, las atábamos juntas. Continuábamos sacándolo de la trampa hasta que aparecían las patas anteriores, que también atábamos. Finalmente, inmovilizábamos la boca del animal con cinta adhesiva, lo que nos permitía realizar un examen rápido y tomar muestras de sangre. Aplicábamos este método con animales de menos de 2,5 metros de longitud. Si atrapábamos un espécimen notable, nos limitábamos a tomar muestras de sangre mientras permanecía en la trampa. Así extrajimos muestras de sangre de 117 dragones de Komodo durante cinco meses de 1994 y 1997. No he terminado de analizarlas. También en 1997 fijé transmisores a ocho para recabar información sobre sus movimientos y la extensión de su territorio.

—C.C.

Occidente desconoció la existencia del dragón de Komodo hasta 1910. Al teniente Van Steyn van Hensbroek, de la administración colonial holandesa, le llegaron comentarios de un "cocodrilo terrestre". Se sumaban a las historias de los marinos de una flota perlera holandesa sobre animales de seis y siete metros de largo. Andando el tiempo Van Hensbroek encontró y mató un varano; medía 2,1 metros, lo que se ajustaba más a la realidad. Envió una fotografía y la piel a Peter A. Ouwens, director del Museo Zoológico y Jardín Botánico de Bogor, en Java.

Ouwens contrató a un cazador, que mató a dos varanos, supuestamente de 3,1 y 2,35 metros, y capturó a dos juveniles, que medían poco menos de un metro. Al examinar los ejemplares, Ouwens se dio cuenta de que el dragón de Komodo era un lagarto monitor. En 1912 Ouwens publicaba un artículo donde describía el nuevo espécimen. Despachaba así la aportación de Van Hensbroek: "Había (éste) recibido información... [de que] en la isla de Komodo había una especie de *Varanus* de tamaño insólito." Ouwens cerraba su escrito proponiendo el nombre de *V. komodoensis* para el nuevo lagarto.

Conscientes de la rareza y valor del dragón de Komodo, la administración local y el gobierno colonial holandés establecieron planes de protección ya en 1915. Después de la Primera Guerra Mundial, el Museo de Zoología de Berlín acometió una expedición que despertó el interés mundial por el animal. En 1926, W. Douglas Burden, del Museo Americano de Historia Natural, realizó una excursión a Komodo, bien pertrechada. Capturó 27 dragones y describió la anatomía a partir del examen de unos 70 individuos.

Tras la de Burden, llegarían 15 expediciones más. Nadie como Auffenberg realizó un estudio de campo tan exhaustivo, desde el comportamiento y la dieta hasta la demografía y las características de la vegetación. Auffenberg corroboró la rareza del dragón. De acuerdo con cálculos recientes, no llegaría a 3500 la cifra de supervivientes en los límites del Parque Nacional de la Isla de Komodo, que agrupa las islas de Komodo (1700 individuos), Rinca (1300), Gili Motang (100) y Padar (ninguno desde finales de la década de 1970) y una treintena más de islotes. No hay censo de Gili Dasami. Otros 2000 podrían vivir en la isla de Flores. Hoy el dragón de Komodo se considera oficialmente una especie "vulnerable", según la Unión Mundial para la Conservación. Se halla también protegido por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Salvajes (CITES).

Contra el dragón de Komodo se han multiplicado las amenazas a lo largo de los últimos 20 años, que hacen temer por su supervivencia en el parque nacional y en la isla de Flores. La desaparición de dragones en Padar tiene que ver, sin duda, con la caza furtiva del ciervo, su presa principal. No resulta fácil vigilar ese entorno agreste e inaccesible a veces. Dos días después de que yo terminara un censo de la isla en 1997, los furtivos abatieron una decena de ciervos. La tendencia decreciente del furtivismo, a pesar de todo, en Padar ha movido a la administración a plantearse un programa de reintroducción.



7. KRAKEN, nacida en el Zoo Nacional de Washington, el 13 de septiembre de 1992, fue el primer dragón de Komodo que vio la luz en cautividad. Esta hembra sigue con vida y mide 87 centímetros desde la punta del hocico a la base de la cola, y pesa 22 kilogramos. Otros 54 dragones nacieron posteriormente en el zoo, a partir de huevos producidos por la madre de Kraken, que fue regalada por Indonesia en 1988. Estos varanos se encuentran ahora en varios zoológicos de los Estados Unidos, Japón, Alemania, Holanda y Singapur.

Padar cubre una superficie de unos 20 kilómetros cuadrados. El número de dragones viene condicionado por la población de ciervos, que no supera los 600 individuos. Sería, pues, muy aconsejable en una nueva y reducida comunidad de dragones de Komodo la diversidad genética, verdadero valladar contra la endogamia.

Para colaborar en el proyecto, inicié un estudio genético de las restantes poblaciones de dragones en 1994. Me proponía establecer el grado de similaridad genética dentro de cada grupo y entre grupos distintos. Trabajo ahora en el análisis del ADN de muestras de sangre de 117 dragones, tomadas en 1994 y 1997. Se pretende que los resultados faculten a las autoridades para escoger las poblaciones fundacionales más idóneas, desde una perspectiva genética, en su plan de la reintroducción de dragones en Padar. La proporción de sexos y la estructura de edades serán otros factores a tomar en consideración.

Los lagartos de Flores se hallan sometidos a una doble amenaza, la reducción de presas y la merma de espacio por intrusión del hombre. Los colonos talan y queman la selva monzónica. Los dragones se numeran entre las primeras especies que desaparecen. En 1997 acometí un estudio biotelemétrico para seguir el movimiento y el tamaño del territorio de dragones adultos en áreas con grado diverso de presencia humana, dentro y fuera del parque nacional. Los datos que se van acumulando año tras año nos determinarán si el acoso humano se limita a empujarlos hacia la emigración o los aboca a la extinción.

Inicié, asimismo, un seguimiento a largo plazo para conocer la distribución y la intensidad de las amenazas contra las poblaciones de la isla de Flores entera. Me sirvo de trampas instaladas en determinados puntos, escogidos a tenor del hábitat y de los informes de avistamientos aportados por la población local. En los últimos 20 años, y por culpa de un arrinconamiento creciente, la especie ha desaparecido en una franja de 150 kilómetros a lo largo de la costa noroccidental de Flores. Las poblaciones de las costas septentrional y occidental también están amenazadas por la deforestación y la caza de ciervos.

El sino de nuestro lagarto va inexorablemente ligado al de otras especies de la fauna y flora. Las medidas que se adopten para protegerlo deberán tomar en consideración el ecosistema en su integridad. Aunque la zona central de Flores no es adecuada para

los dragones, las regiones meridional y oriental podrían albergar poblaciones dispersas, desconocidas para los investigadores, que sirvieran de "paraguas" de defensa del ecosistema en su conjunto. Cada año acuden a la zona unos 18.000 visitantes atraídos por la fama de ese lagarto mayúsculo. Los bosques que lo albergan podrían convertirse en piedra angular de un plan de protección viable para todo el entorno, autofinanciado por el ecoturismo.

Abrigo la esperanza de salvar la población de dragones mediante la modificación de las estrategias de uso de los recursos naturales. Hay que ir a una explotación viable del suelo. Cuento con el interés manifestado por las autoridades locales. La agricultura de roza y quema podría sustituirse por el cultivo de plantas que no precisan el desbroce de la bóveda arbórea para su rentabilización. La simple instalación de una tejería y formación en albañilería podría evitar la tala de madera destinada a la vivienda.

El destino de unos miles de dragones de Komodo, confinados en un minúsculo rincón de la Tierra, se encuentra en manos del hombre. Igual que en otras cuestiones donde está involucrada la biodiversidad y su mantenimiento, las decisiones políticas, estéticas, científicas y económicas pueden decantarse entre un mundo homogéneo de alienante uniformidad o apostar por el misterio del cartógrafo medieval cuando anotaba en su mapa los habitantes de lo inexplorado: "Aquí viven los dragones".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

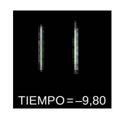
A MODERN DRAGON HUNT ON KOMODO. L. Broughton en *National Geographic*, vol. 70, págs. 321-331; 1936.

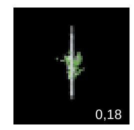
ZOO QUEST FOR A DRAGON. David Attenborough. Lutterworth Press. 1957. Reimpreso por Oxford University Press, 1986.

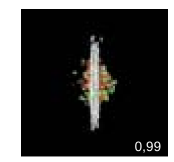
THE BEHAVIORAL ECOLOGY OF THE KOMODO MONITOR. Walter Auffenberg. University of Florida-University Presses of Florida, 1981.

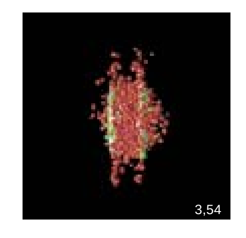
KOMODO: THE LIVING DRAGON. Nueva edición. Dick Lutz y J. Marie Lutz. Dimi Press. Oregón, 1996.

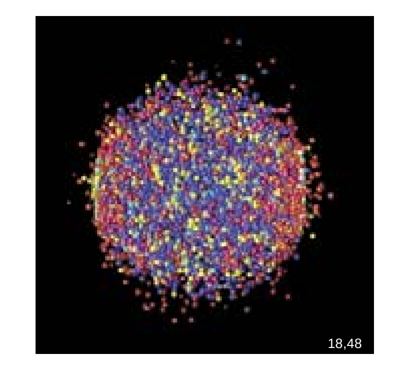
Hay una conferencia de Walter Auffenberg disponible (en RealAudio) en la World Wide Web: www.si.edu/natzoo/hilights/lectures.htm.











Se prepara un nuevo colisionador de partículas que creará muy pronto materia cuya densidad y temperatura remedarán las que alcanzó la materia primigenia en el alba del universo

Una gran explosión originaria en pequeño

Madhusree Mukerjee

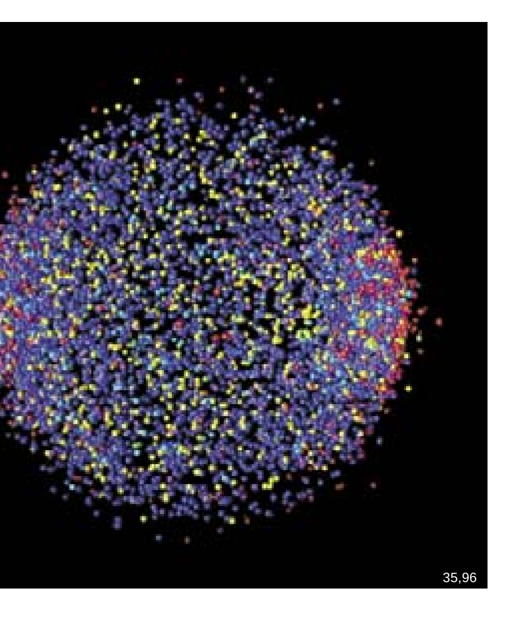
Bajo tierra, el túnel se desdobla en dos ramales. Uno tuerce a la derecha, a la izquierda el otro. Con ellos, los tubos de haces de partículas se pierden de vista. Aquí, en el subsuelo, priman los matices del gris del hormigón, del acero, del lustre del aislante. Impregna este ambiente frío un olor a recortes de metal; de lejos llega el traqueteo amortiguado de una máquina que busca posibles fallos en el vacío de los tubos. Avanzamos. El túnel se endereza. Los tubos de los haces se funden en uno solo, mucho mayor. Saltando por encima de un grupo de conductos entrecruzados entramos en una cámara cavernosa, bañada por el resplandor amarillento de los focos de sodio. En el centro de la estancia, hay pintado en el suelo un círculo negro y escrita una frase: "punto de colisión".

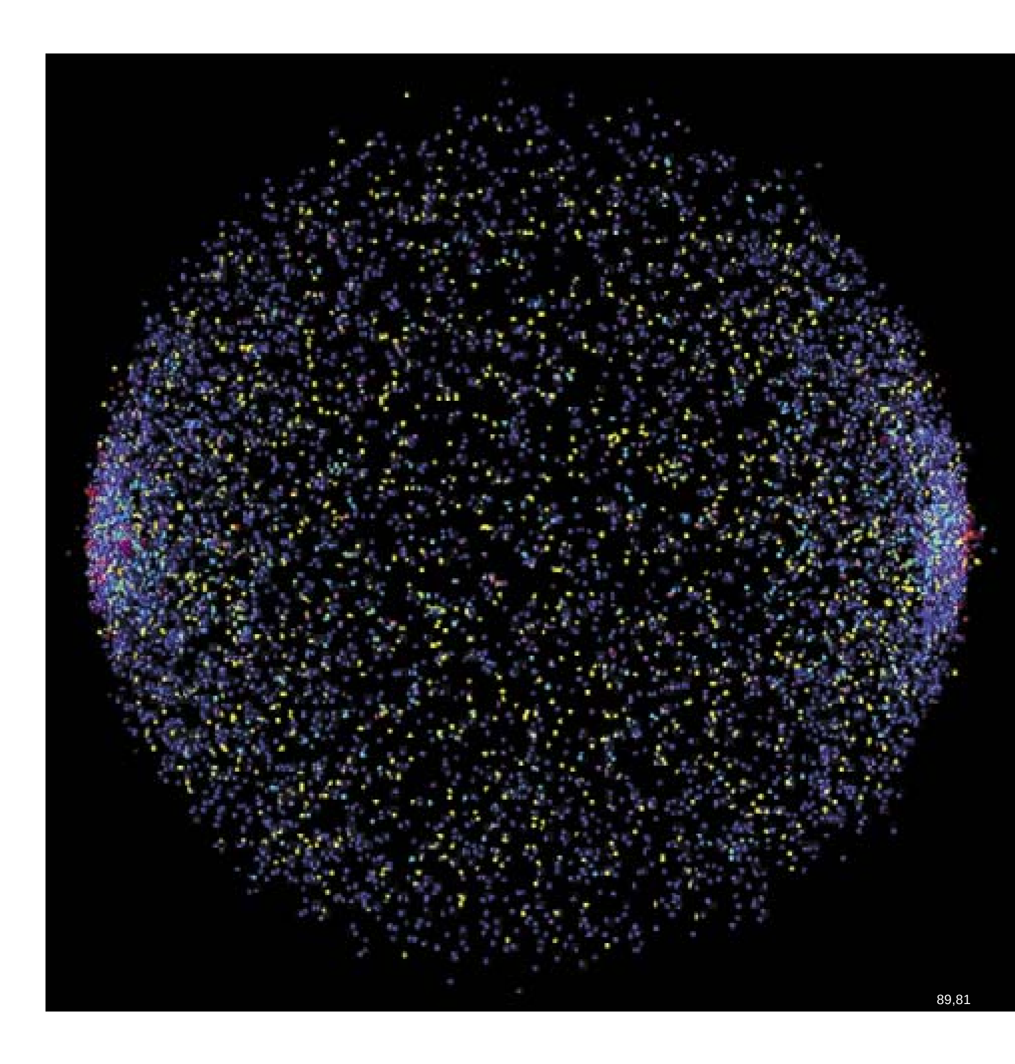
Sobre ese punto del espacio se creará el mes que viene materia cuya densidad y temperatura remeden las que alcanzó la primigenia en los microsegundos subsiguientes a la gran explosión. El flamante Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC), del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Long Island, podrá acelerar núcleos cuyo tamaño vaya desde el del hidrógeno (un solo protón) al del oro (197 protones y neutrones). Un nucleón —es decir, un protón o un neutrón— tiene en reposo una masa o energía de alrededor de 1 GeV, o mil millones de electronvolts. Los imanes superconductores del RHIC acelerarán los núcleos hasta que, a causa de la relatividad, cada nucleón adquiera la masa o energía que se desee, siempre y cuando caiga entre los 10 y los 100 GeV.

Pelotones de núcleos acelerados circularán, en sentido opuesto, por los dos tubos de los haces hasta que se encuentren dentro de los cuatro detectores instalados a lo largo de los 3,8 kilómetros de la circunferencia del túnel. Si dos núcleos pesados chocan entre sí, cada par de nucleones en su interior liberará una energía de 200 GeV, lo que probablemente elevará la temperatura muy por encima de los 10^{12} kelvins (cien millones de veces mayor que la de la superficie solar). En otras palabras: los núcleos estallarán.

Las cenizas de la bola ardiente encerrarán un secreto: si los protones y los neutrones se desintegraron o no con el tremendo calor del impacto, liberando quarks y gluones. (Un protón consta de tres quarks, dos "arriba" y uno "abajo", que los gluones mantienen unidos. El neutrón está hecho de dos quarks abajo y uno arriba.) Los teóricos creen que al sobrepasarse los 10^{12} kelvins se formará un plasma —una "sopa"— de quarks y gluones. "Esta forma de materia no se ha visto en el universo desde hace miles de millones de años (que sepamos)", expone Frank Wilczek, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

El plasma durará sólo 10^{-23} segundos, más o menos —lo que tarda la luz en cruzar un núcleo— y ocupará un volumen de unos 10 fermi de lado (un fermi, medida típica del núcleo, vale 10^{-13} centímetros). Se desintegrará en un montón de partículas que viajarán un billón de veces más céleres de lo que puedan captarlas los detectores. Está por ver si una colisión así emitirá 15.000 partículas o sólo 1000. Pero en las miríadas de trazas que dejarán se buscarán pruebas de la existencia del fugaz plasma. No es buscar una aguja en un pajar, sino mirar un pajar y tratar de resolver si hay una aguja dentro.





1. EN ESTA COLISION NUCLEAR, simulada por el modelo de la "cascada de partones", se ven dos núcleos de oro, en un principio aplastados como tortas a causa de la relatividad. El impacto provoca la dispersión de algunos quarks ( ) y gluones ( ). Pero cada núcleo atraviesa el otro, dejando tras de sí quarks y gluones con gran energía que enseguida forman agregados ( ). Estos se fragmentan a continuación en piones ( ), kaones ( ) y otras partículas, que a su vez interaccionan y se desintegran. La bola de fuego crece un billón de veces antes de incidir en los detectores. (La unidad de tiempo es el que tarda la luz en recorrer 10^{-13} centímetros.)

Si los físicos experimentales tienen ante sí un reto titánico se debe en parte a la incapacidad de los teóricos, que apenas pueden ofrecer una guía incierta. "Poseemos sólo una vaga idea de qué hace la materia a esas energías", señala Gordon Baym, de la Universidad de Illinois. El problema está en la interacción fuerte de "color", la que mantiene unidos a los protones, neutrones y núcleos. Su intensidad centuplica la del electromagnetismo. Además la transmiten los gluones, que, al contrario que otros vehículos de fuerzas, como los fotones, se atraen entre sí. Esta pegajosidad de los gluones, combinada con su fuerza bruta, determina que la cromodinámica cuántica —la teoría de la interacción fuerte de color— resulte a menudo inabordable para el cálculo.

Los teóricos sólo pueden habérselas con la interacción fuerte en ocasiones especiales; si es poco intensa, por ejemplo. Paradójicamente, la fuerza fuerte se desvanece cuando quarks y gluones están muy cerca unos de otros. Imagínese quarks unidos a otros quarks y antiquarks por cuerdas de gluon. (Un antiquark es el *alter ego* de un quark, de la misma masa que éste aunque de cargas opuestas.) La cuerda actúa como una goma elástica. Cuando se intenta separar una pareja de quark y antiquark —un mesón—, la goma que los une tira de ellos con una fuerza constante. En consecuencia, haría falta una energía infinita para separarlos; nunca se ven, pues, quarks sueltos. Pero cuando el quark y el antiquark están muy juntos, la goma queda floja y cada uno puede ignorar la presencia del otro. Este armonioso estado de cosas es el que se daría, aunque brevemente, en el plasma de quarks y gluones.

Los teóricos creen que las partes del espacio donde parece que no hay nada —el llamado con impropiedad vacío— rebosan en realidad de pares quark-antiquark que dejan constancia de su presencia sólo indirectamente. La situación no es del todo afortunada. Por la razón que sea, el universo ha optado por acoplar en el vacío ordinario quarks dextrógiros con antiquarks levógiros y viceversa. (La quiralidad de una partícula designa el sentido de su rotación interna, vista según la dirección de su movimiento.) De esa forma ha ido contra una sutileza matemática llamada simetría quiral, que dice que los quarks y antiquarks levógiros son independientes de los dextrógiros. Pero a una temperatura o densidad semejante las parejas malcasadas que llenan el vacío deberán romperse; en tal caso se manifestará en él la simetría quiral.

No hay forma más segura de calibrar el comportamiento de la interacción fuerte en una situación real que acometer cálculos gigantescos. Los teóricos pueden simular el espacio-tiempo con



2. LAS LINEAS RECURVADAS del Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) acelerarán los núcleos por medio de campos electromagnéticos que imanes superconductores engendran. Las regiones exteriores del tubo contienen criostatos, dentro de los cuales circula gas de helio frío y comprimido. Las líneas trenzadas acelerarán pelotones de núcleos en direcciones opuestas hasta que choquen en puntos situados dentro de los detectores.

un superordenador mediante una red de puntos. Sobre éstos sitúan, para estudiar su interacción, quarks y antiquarks ligados por cuerdas gluónicas. Los cálculos en cuestión —la cromodinámica cuántica de redes— predicen que los quarks y los gluones se liberarán a la misma densidad de energía a la que se restaurará la simetría quiral. En tal caso, las colisiones del RHIC deberán producir un plasma de quarks y gluones con una simetría quiral impecable.

Por desgracia, la cromodinámica cuántica de redes presenta graves limitaciones. No puede abordar las situaciones dinámicas, sólo las estáticas. Esto quiere decir, entre otras cosas, que sólo puede vérselas con sistemas en equilibrio. Tampoco puede describir un sistema donde haya más quarks que antiquarks. Puesto que los protones y los neutrones son puro quark y no tienen ni un antiquark, lo probable es que al chocar dos núcleos haya, en efecto, exceso de quarks. En consecuencia, no podemos aplicar directamente la cromodinámica cuántica al "choque y salpicadura" —en expresión familiar de los físicos— de un impacto nuclear enérgico.

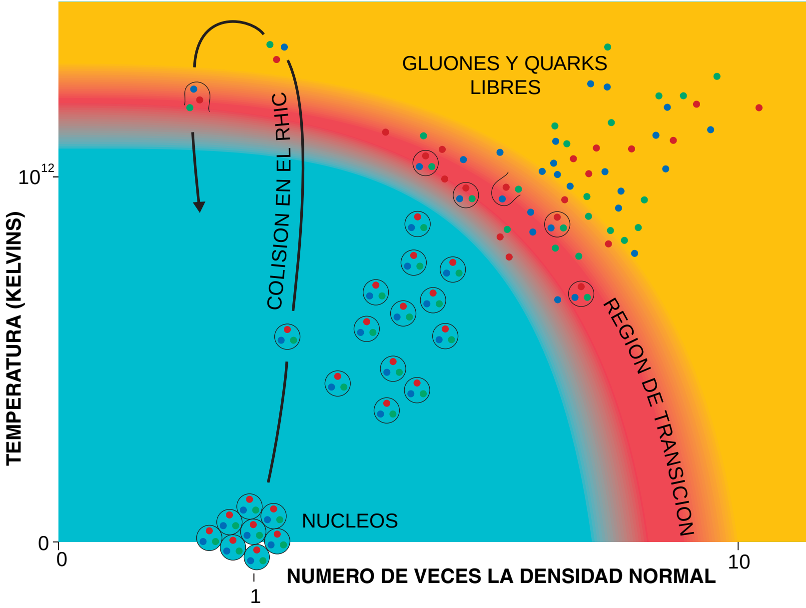
Toda teoría realista habrá de combinar "la relatividad, que se las trae, con la teoría de campos, que se las trae, con la dinámica del no equilibrio, que se las trae, con la física de muchos cuerpos, que se las trae", dice reiterativo Horst Stöcker, de la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt. No queda otro remedio que basarse en aproximaciones.

Un modelo, por ejemplo, trata los quarks como si fuesen bolas de billar que rebotan unas contra otras, e incorpora la mecánica cuántica y las probabilidades, medidas experimentalmente, de la creación de partículas compuestas. (Esta teoría, la cascada de partones, fue iniciada

3. ESTE CONJUNTO DE FOTOMULTIPLICADORES, construido por físicos japoneses, identificará los electrones por medio de su radiación de Cerenkov característica. Se instalará dentro del detector PHENIX, encargado de medir las partículas ligeras generadas en la colisión.



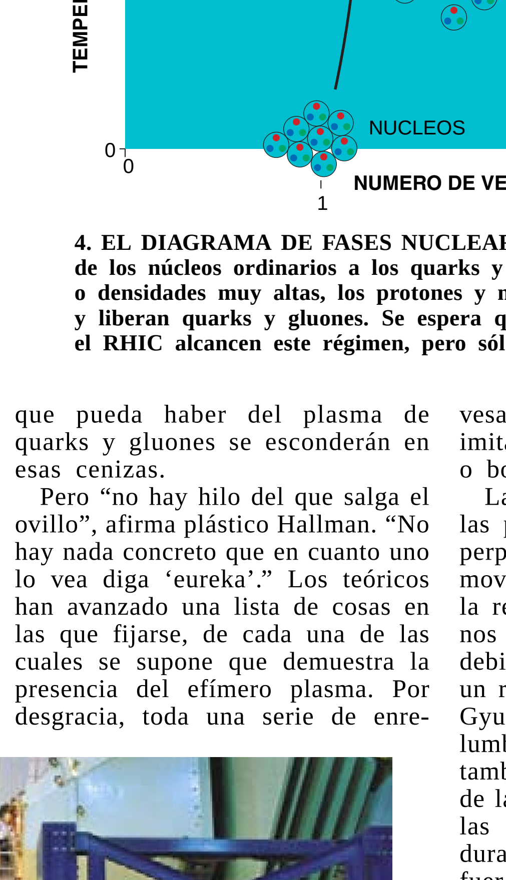
por Klaus Kinder-Geiger, quien murió trágicamente en el accidente aéreo de Swissair del año pasado.) Otro concibe los núcleos a modo de gotas de fluido y aplica las leyes de la hidrodinámica con parámetros calculados por la cromodinámica cuántica de redes. En el mercado hay también combinaciones y versiones refinadas de estos esquemas básicos. “Existen tantos modelos como teóricos de esta especialidad”, critica con sorna Tim Hallman, físico experimental de Brookhaven. Sin duda, cada modelo describirá muy bien algún aspecto de la colisión, pero ninguno atinará en todo.



4. EL DIAGRAMA DE FASES NUCLEARES muestra la transición calculada de los núcleos ordinarios a los quarks y los gluones libres. A temperaturas o densidades muy altas, los protones y neutrones de los núcleos se rompen y liberan quarks y gluones. Se espera que las colisiones de los núcleos en el RHIC alcancen este régimen, pero sólo por un momento.

De los choque en el RHIC se espera que, al impactar, los dos núcleos penetrarán al principio uno en el otro. Los quarks y gluones de uno de los núcleos habrá apresado los del otro por medio de lazos de “pegamento” glúonico. Conforme los núcleos se vayan separando, esas cuerdas de gran energía saltarán, se enredarán o se fusionarán, y se producirá, o eso se espera, el plasma. Este se enfriará deprisa y radiará electrones, positrones y sus primos más pesados, los muones y antimuones.

Merced a procesos que reproducirán los de la gran explosión —muy difíciles de calcular— la mayoría de los quarks y gluones se condensarán en “pellas” compuestas de dos o tres quarks o antiquarks. Algunos “hadrones” de éstos se descompondrán en otras partículas, que a su vez se desintegrarán. Las pruebas que pueda haber del plasma de quarks y gluones se esconderán en esas cenizas.



Pero “no hay hilo del que salga el ovillo”, afirma plástico Hallman. “No hay nada concreto que en cuanto uno lo vea diga ‘eureka’.” Los teóricos han avanzado una lista de cosas en las que fijarse, de cada una de las cuales se supone que demuestra la presencia del efímero plasma. Por desgracia, toda una serie de enrevesados fenómenos nucleares puede imitar la mayoría de esas señales o borrarlas.

La primera tarea será aprehender las partículas que salgan disparadas perpendicularmente a la dirección de movimiento del haz. Han de venir de la región de colisión. “Sus energías nos dicen si las condiciones son las debidas para que exista el plasma. Es un requisito previo”, explica Miklos Gyulassy, de la Universidad de Columbia. El análisis debería mostrar también si la temperatura (deducida de la distribución del momento entre las partículas) se mantuvo estable durante un brevísimo instante. Si fuera así podría significar que hubo una transición de fase, como cuando se detecta que el agua hierve por el valor registrado en el termómetro. Gyulassy cree, sin embargo, que el efecto será demasiado débil para resultar concluyente.

Además, un estudio muy fino de los piones (mesones que contienen quarks y antiquarks arriba y abajo) y de las correlaciones entre ellos revelará el tamaño de la bola de fuego; se fundará en un efecto mecanocuántico empleado en su origen para medir el tamaño de las estrellas. Este análisis podría enseñar quizás hasta la velocidad a la que crece la bola. Tratando la sustancia nuclear como un fluido, Gyulassi y otros han llegado a la conclusión de que la bola frenará momentáneamente



5. EL DETECTOR PHENIX, visto aquí antes de ser ensamblado, posee unas “alas” cónicas que captan los muones salidos de los impactos nucleares. Algunas placas de acero de estas alas, traídas de San Petersburgo, se cuentan entre las mayores jamás fundidas.

su expansión porque la velocidad del sonido adquirirá insólita lentitud cuando el plasma se desintegre en hadrones. “Ese sí que sería un hilo del ovillo”, sostiene. Pero harán falta años de penosa recogida de datos para que se vea qué hay.

Está también la información que aportan electrones y muones con sus antipartículas, que son insensibles a las interacciones fuertes. Combinando los datos de las energías y de los momentos de estas partículas, puede afirmarse si un par —un muon y un antimuón, o un electrón y un positrón— procede de la desintegración de un mesón concreto, como el ϕ (phi) o el ρ (rho). Si estos mesones se generan en una fase de la materia donde esté restaurada la quiralidad, podrían tener una masa inferior a su valor normal (sin embargo, también esto se ha puesto en entredicho).

Otra “huella” del plasma de quarks y gluones muy prometedora es la caída del porcentaje creado de mesones de otro tipo, el llamado J/Ψ. Este mesón, un quark encanto ligado a uno antiencanto, se producirá sólo raramente en la colisión nuclear. Además, sigue el argumento, no puede nacer un J/Ψ en un plasma de quarks y gluones porque el bombardeo de las partículas que lo rodean lo descompondría. Así que ese tipo de mesón se observaría más raramente (por mediación de sus productos de desintegración), si se compara con la frecuencia calculada. Físicos experimentales del CERN han dado a conocer el descubrimiento de indicios de este efecto en colisiones de núcleos de plomo de una energía efectiva de 17 GeV por impacto nucleón-nucleón. A lo que Stöcker pone sordina; se trata de una huella simulable en otros procesos.

Quizá la posibilidad más apasionante sea la aparición de una pella extrañícula (*strangelet*): una “gota” de quarks con muchos quarks extraños. Los quarks extraños abundarían sobremanera en el plasma de quarks y gluones y podrían, en teoría, agruparse y crear, junto con quarks arriba y abajo, objetos de ese tipo. Encontrar una extrañícula —un estado de la materia tan raro, al menos, como el propio plasma de quarks y gluones— sería emocionante, pero persisten las dudas acerca de su estabilidad necesaria para ser captada por los detectores.

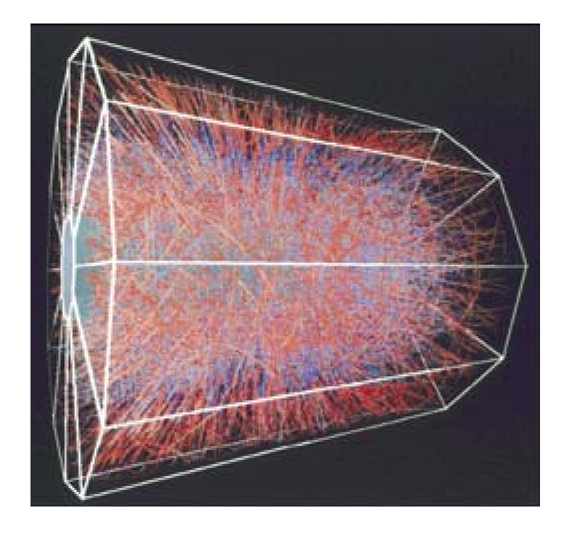
Suma y sigue. Los teóricos ruegan a los físicos experimentales que busquen condensados quirales desorientados (resultantes de la pequeñísima región espacial en el centro de la colisión, insegura de cómo emparejar sus quarks y antiquarks), violaciones de la paridad de carga (una simetría a la que, según suele creerse, se somete la interacción fuerte) y un sinnúmero de otros fenómenos hipotéticos. Y por si esto fuese poco, Stöcker mantiene que un plasma de quarks y gluones no se atiene a la simple idea de un “gas libre”, sino que es un sistema complejo, con interacciones, que en muchos aspectos se parecen a la fase hadrónica subsiguiente. La búsqueda de un hilo para sacar el ovillo podría, pues, estar condenada desde el principio.

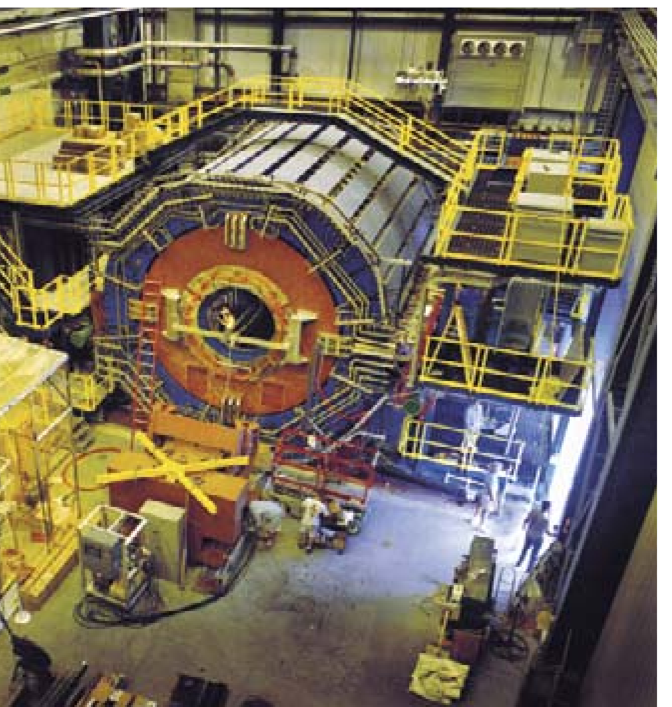
No parece que los experimentales se arredren. Barbara Jacak, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, recoge su sentir: “Dejamos a los teóricos el razonamiento que empieza ya a parecerse a la disputa sobre el número de ángeles que caben en la cabeza de un alfiler.” Pronto estarán los detectores contando para ella y reduciendo las posibilidades con el mero peso de los datos.

Me planto bajo la maraña de cables ante el detector STAR, conjunto apretado de cilindros concéntricos cuyo eje coincide con el haz. El instrumento primario, un artilugio grande y plateado repleto de cintas de cables, situará tridimensionalmente la trayectoria de cada partícula cargada que entre; limpiará su memoria tan deprisa, que podrá registrar los detalles de mil colisiones por segundo. Ciñen a este cilindro otros dispositivos, entre ellos un calorímetro que medirá la energía de cada partícula.

La habilidad especial de STAR reside en su exhaustividad. De 6000 partículas, entre las 10.000 (en su mayoría piones) que saldrán de cada colisión, medirá momento, energía y otras propiedades. (El resto de los residuos arrojados por el impacto viajará demasiado cerca de la línea del haz.) Permitirá calibrar magnitudes globales, como la temperatura y la densidad de energía de la bola de fuego. Viendo la cantidad de rayas que emanaban en una simulación de las trazas esperadas, la capacidad del aparato me pareció casi increíble.

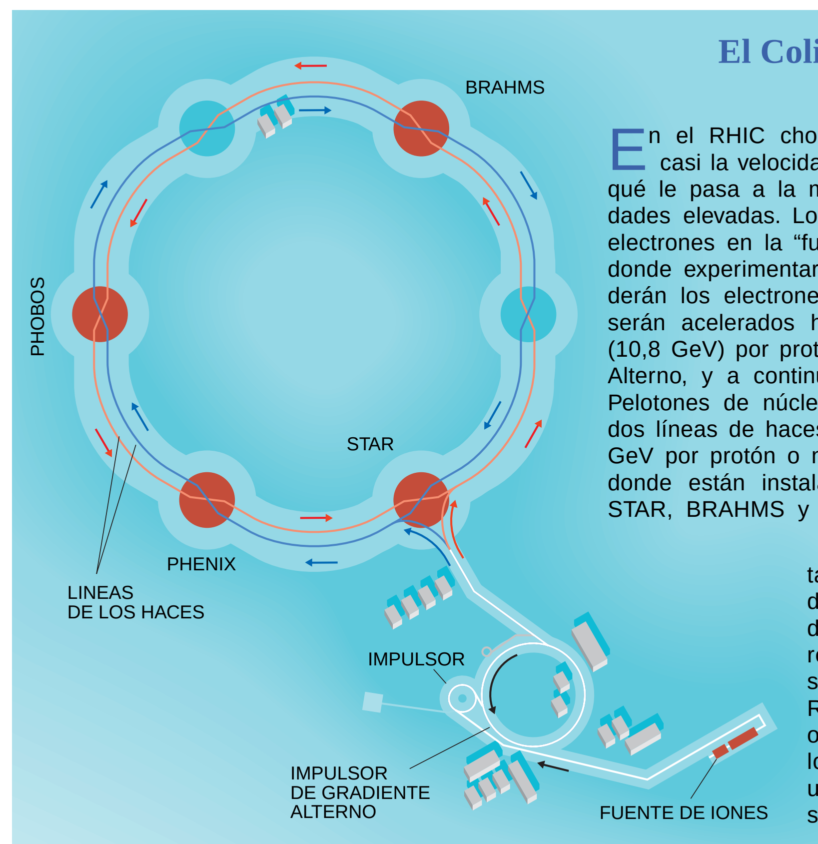
PHENIX es un detector aún mayor, nacido de las cenizas de tres dispositivos que no llegaron a nada por falta de dinero y de personal. Con ese oscuro y voluminoso cuerpo que se alza 12,2 metros sobre nosotros, se parece a un cóndor cuyas “alas”, extendidas a lo largo de las líneas de los haces, se han diseñado para que capten muones.





6. EL DETECTOR STAR (*izquierda*) localizará las trayectorias de miles de partículas generadas por la colisión de los núcleos en su centro y registrará sus energías y momentos. (En esta foto no se ve el equipamiento electrónico interno.) Una simulación (*arriba*) de las trazas que se producirán en la cámara de “proyección temporal” central muestra la complejidad del problema.

El Colisionador de Iones Pesados Relativistas



En el RHIC chocarán entre sí núcleos que se muevan a casi la velocidad de la luz. Merced a ello podrá observarse qué le pasa a la materia subnuclear a temperaturas y densidades elevadas. Los átomos, parcialmente despojados de sus electrones en la "fuente de iones", correrán hasta el impulsor, donde experimentarán una aceleración moderada. Al salir perderán los electrones que les queden; los núcleos resultantes serán acelerados hasta los 10.800 millones de electronvolts (10,8 GeV) por protón o neutrón en el Sincrotrón de Gradiente Alterno, y a continuación se los inyectará en el colisionador. Pelotones de núcleos circularán en sentidos opuestos en las dos líneas de haces y se acelerarán hasta un máximo de 100 GeV por protón o neutrón hasta que choquen en las regiones donde están instalados los detectores (por ahora, PHENIX, STAR, BRAHMS y PHOBOS).

El Departamento de Energía de los Estados Unidos aportó los 365 millones de dólares que ha costado el colisionador. Los detectores —otros 200 millones de dólares— son proyectos internacionales. Han sido costeados por Estados Unidos, Japón, Rusia y algunos países más. Japón aporta otro programa para el RHIC, que estudiará los orígenes del espín del protón, y financia un instituto teórico y la construcción de un superordenador a instalar en Brookhaven.

—M.M.

El tamaño de PHENIX deriva de su misión: captar e identificar partículas ligeras. El momento de un electrón, por ejemplo, lo da la curvatura de la traza que describe cuando está sujeto a un campo magnético intenso. Y su identidad se conoce por un anillo característico que los fotones emiten, la radiación de Cerenkov. La exactitud de la medición de lo uno y lo otro depende de que el electrón cubra cierta distancia. PHENIX debería al final discernir, entre otras cosas, si los electrones y los muones producidos indican que ha habido mesones con una carencia de masa.

Hay otros dos detectores. BRAHMS comprobará cuántos nucleones pasan afectados mínimamente por el impacto. PHOBOS, por el contrario, captará partículas emitidas en todas las direcciones, en especial las que tienen una energía demasiado pequeña para penetrar en los detectores mayores. El proyecto del colisionador deja espacio para dos detectores más.

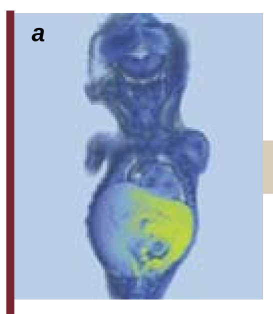
Tras la sesión inicial de junio, los operadores del RHIC lo cerrarán para sintonizar con cuidado los detectores y reparar cualquier problema mínimo que pueda surgir. Los experimentos empezarán en serio en noviembre. La versatilidad del RHIC ofrece la esperanza de que desentrañará muchos aspectos de las colisiones, aun cuando no pueda despejar todas las incógnitas de la teoría. Los operadores, por ejemplo, pueden aumentar la energía de un haz de oro y esperar que se produzca un cambio. Si el número de partículas emitidas se duplica cuando la energía supera cierta cota, será señal de una alteración drástica del comportamiento de los quarks y de los gluones. En la mejor situación posible se manifestarían a la vez varias de las señales de un plasma de quarks y gluones.

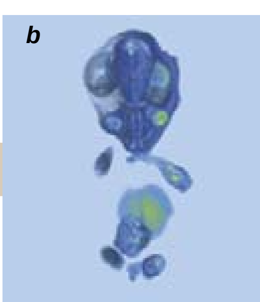
Además, puede modificarse el tamaño de los núcleos del haz sustituyendo el oro por azufre. Si esa cota umbral no se observa en las colisiones de azufre, revelará que en las de oro actuaba una física nueva: el azufre no es lo bastante pesado para producir plasma. Y los impactos, oblicuos en vez de frontales, ofrecerán pistas complementarias.

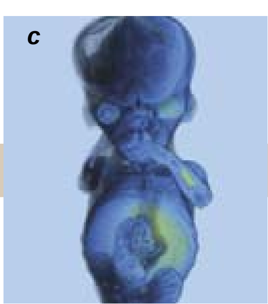
"Tengo mucha fe en el ingenio de los experimentales", comenta Wilczek. Variando laboriosamente los parámetros se podría obtener un cuadro de la gama de bolas de fuego posibles, y no sólo de la que supone la creación de un plasma de quarks y gluones. Esa visión polifacética, sostiene Stöcker, debería ser la verdadera meta. "Un ser humano tiene muchos rasgos (los ojos, los labios, los pies). Reducido a una esfera de cien kilos de masa, no se le hace justicia." Podrían aparecer miríadas de fascinantes fenómenos, y quizás algunos ni imaginados por los teóricos. Nadie duda de que nos pondrán más cerca del origen del universo.



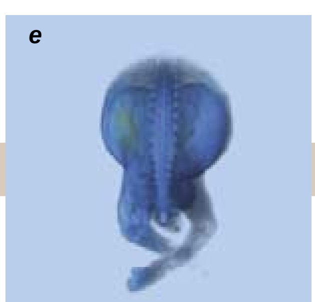
7. "EL PARTO" llaman los técnicos del RHIC a la llegada de la cámara de proyección temporal, procedente del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley.









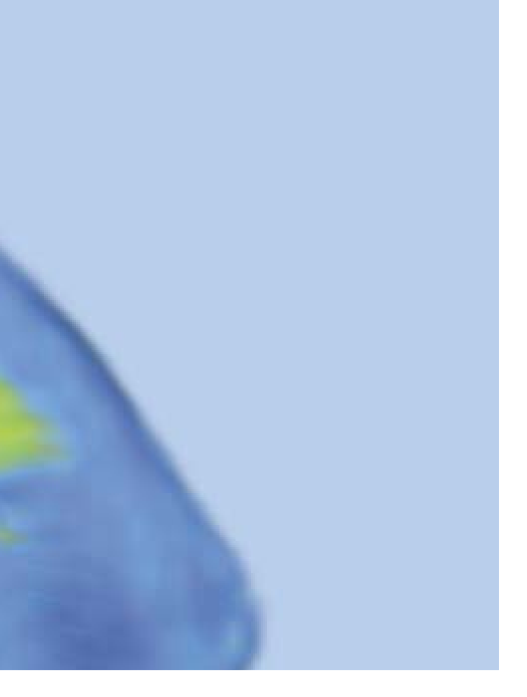


Feto temprano (64 días)

Representación visual de embriones humanos

La microscopía de resonancia magnética nos revela los secretos escondidos en los primeros estadios del desarrollo embrionario

Bradley R. Smith



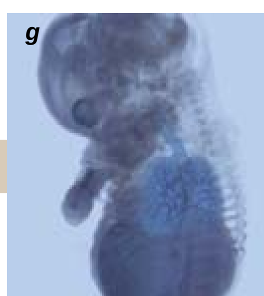
Microfotografía con luz visible

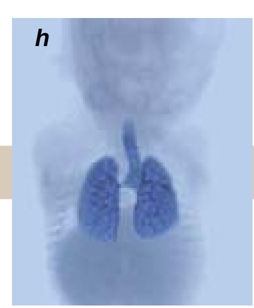
Un nuevo horizonte biológico se me abre cada mañana a mi llegada al laboratorio de microscopía *in vivo*, del hospital clínico de la Universidad de Duke. Me aguarda la contemplación de imágenes tridimensionales, precisas y esclarecedoras, del interior de embriones humanos conservados *in vitro*, obtenidas mediante microscopía de resonancia magnética (MRM). Este tipo de embriones "virtuales" me permite emprender viajes simulados por ordenador por cualquiera de los sistemas recién pergeñados del cuerpo. Con estas imágenes puedo generar secuencias animadas del desarrollo embrionario, impensables hasta hoy.

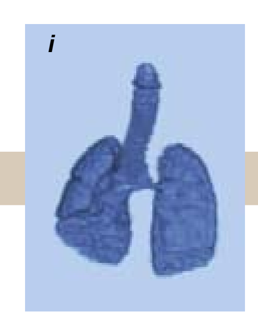
Aumenta la demanda de información de ese tipo por los biólogos que se afanan en comprender las etapas del desarrollo normal y patológico, así como los factores que indican cada proceso a seguir. Nuestro conocimiento se debe en buena medida al estudio de cortes bidimensionales de embriones de animales normales y de embriones de animales

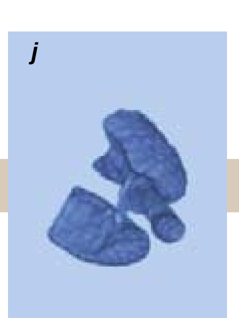
1. FETO HUMANO de 64 días. Se ha obtenido su representación visual mediante microscopía de resonancia magnética (MRM) y microscopía óptica (*pequeño superior*). En esta etapa, el embrión tiene una longitud aproximada de 30 milímetros. Las técnicas de representación por ordenador pueden convertir en translúcidas unas partes del embrión y dejar opacas otras. Al ajustar así la opacidad del espécimen, podemos observar estructuras internas a diferentes profundidades y en su entorno natural sin dañar la muestra (*a-c*). Podemos enfocar, girar o alejar la imagen del embrión (*d-f*), o usar el método de representación por segmentación para enfocar órganos específicos, como la formación de los pulmones (*g-k*).



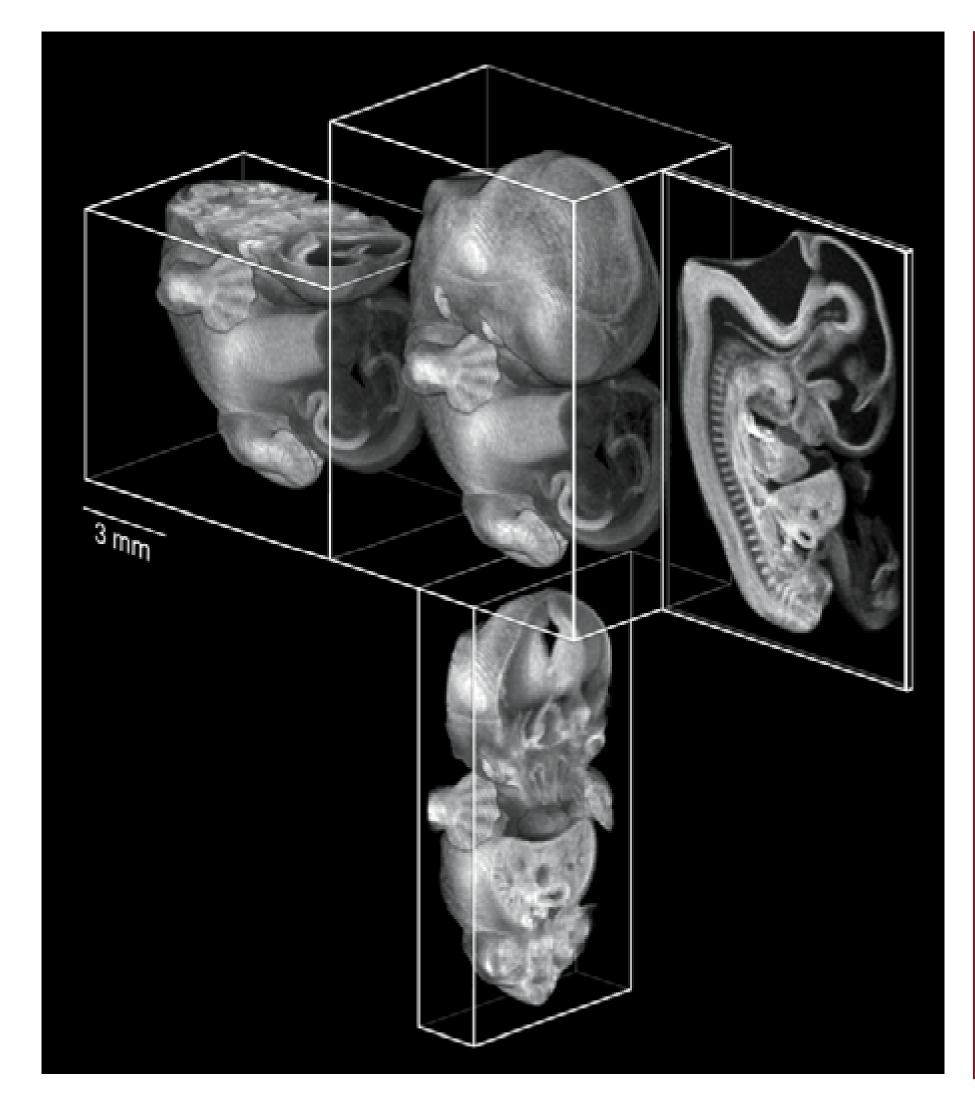














Etapa Carnegie 18 (44 días)

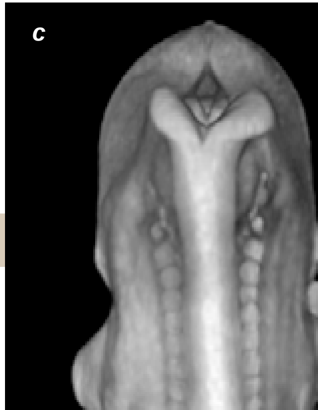
3. CORTES DE UNA IMAGEN TRIDIMENSIONAL para mostrar en fino detalle el interior de un embrión de 44 días, correspondiente a la etapa Carnegie 18 (*en la parte superior se puede ver una imagen obtenida con microscopía óptica*). El embrión, del tamaño de una alubia, aún tiene unidos los dedos de manos y pies. Pero presenta cerebro con dos hemisferios, precursores de vértebras (*estructuras con forma de guión a la derecha*) y órganos internos. La MRM permite cortar una misma muestra por varios planos diferentes, lo que proporciona una información interna muy valiosa sin tener que destruir el espécimen.

2. TUBO NEURAL de un embrión de 47 días (*en su saco amniótico, en la micrografía óptica de la parte inferior izquierda*), sometido a examen mediante la técnica de MRM. Al manipular las imágenes digitales podemos crear secuencias de ordenador (evolución interna o "inmersiones") del tubo neural, precursor del cerebro y la médula espinal. En esta evolución interna se hace girar al embrión (*a-c*); el observador parece entrar en el tubo neural (*d*) para emprender un viaje virtual por las vesículas craneales, que se convertirán en ventrículos del cerebro. El recorrido continúa por el romboencéfalo, por el techo del cuarto ventrículo y, de ahí, por el mesencéfalo (*e-h*), antes de salir del ventrículo (*i, j*) y mostrar los hemisferios cerebrales.









Etapa Carnegie 19 (47 días)

sometidos a manipulación genética. No obstante, la mejora del diagnóstico y del tratamiento de las malformaciones y enfermedades congénitas del hombre requiere que se establezca una relación entre la información obtenida de estos modelos animales y las etapas correspondientes del desarrollo embrionario humano.

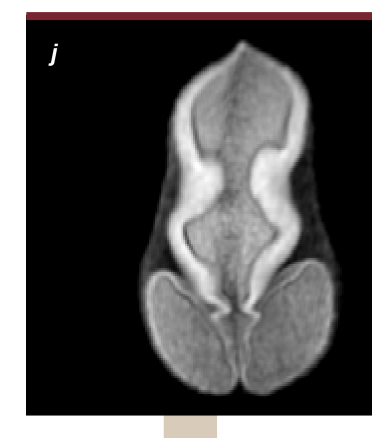
Así las cosas, el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano (NICHD) me ofreció en 1996 un contrato para crear una base de datos de embriones virtuales a partir de la Colección Carnegie de Embriones Humanos. La Colección Carnegie, de enorme valor e instalada en el Museo Nacional de Salud y Medicina del Instituto de Patología de las Fuerzas Armadas (Washington, D.C.), guarda embriones humanos de cada etapa del desarrollo, de un día a embriones de ocho semanas y fetos tempranos (un embrión se transforma en feto a las ocho semanas de la concepción). La muestra más pequeña mide unos 0,2 milímetros; la mayor tiene una longitud de unos 30 milímetros, el tamaño de una almendra. El grueso de la Colección Carnegie está formado por productos de aborto (espontáneo o provocado) recogidos entre 1887 y 1917 por Franklin Paine Mall. La colección ha venido creciendo con la inclusión de embriones descubiertos en autopsias de mujeres encintas.

La colección divide el desarrollo embrionario en 23 etapas, definidas por hitos específicos, verbigracia, el momento en que aparece el botón de una extremidad. La NICHD me ha encargado que cree imágenes MRM de embriones desde la etapa Carnegie 10 (22 días después de la concepción) —cuando aparece el primer arco faríngeo, que después pasa a formar parte de la mandíbula— hasta la primera semana del desarrollo fetal. (Dale S. Huff, del Hospital Infantil de Filadelfia, revisó la colección para escoger los mejores especímenes a representar.) Biólogos y médicos interesados en el desarrollo embrionario pueden recurrir al trabajo ya realizado, así como el público curioso, a través de las páginas de Internet. Se han terminado las etapas Carnegie 14, 15, 17, 19, 22 y 23; los datos sobre las restantes se publicarán hacia junio del 2000.

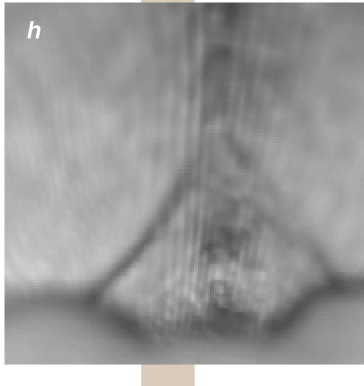
Para crear esas imágenes sin precedentes, coloco cuidadosamente el embrión en el interior de un tubo, que después introduzco en un imán superconductor. La técnica MRM es semejante a la de formación de imágenes por resonancia magnética (IRM), prueba rutinaria en los hospitales. Ambas técnicas aprovechan la energía en la banda de radiofrecuencia para excitar y detectar protones en el agua del interior de los tejidos. Sin embargo, la MRM revela detalles cuya finura trasciende la idónea para el diagnóstico clínico. Aunque la IRM puede producir imágenes con una resolución de voxel (elemento de volumen) de un mililitro cúbico, la MRM registra voxeles que son un millón de veces menores. Resoluciones que sólo se consiguen mediante imanes potentes, gradientes de perturbación del campo magnético intensos y bobinas de formación de imágenes capaces de acomodar muestras diminutas.

Las técnicas de MRM, desarrolladas en la Universidad de Duke por el grupo de G. Allan Johnson, no dañan a los embriones. Con la microscopía tradicional, por contra, hay que seccionar las muestras en centenares de cortes finísimos. La MRM genera embriones tridimensionales virtuales, sin deformaciones, en una fracción del tiempo que haría falta para crear reconstrucciones a partir de la microscopía óptica. Podemos producir datos tridimensionales de un embrión en menos de dos horas, en comparación con los cientos de horas que se requiere con el microscopio óptico.

Aunque la MRM obtiene datos tridimensionales minuciosos, se cuenta con programas informáticos para presentar los resultados. Para crear imágenes como las aquí ofrecidas, nos apoyamos en un programa de representación volumétrica que va

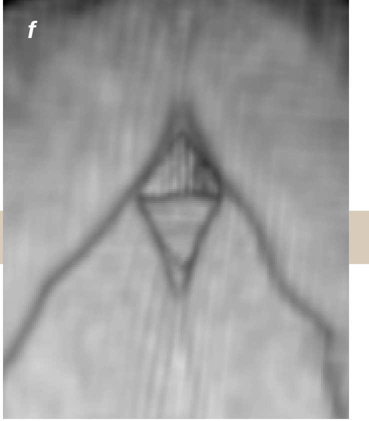


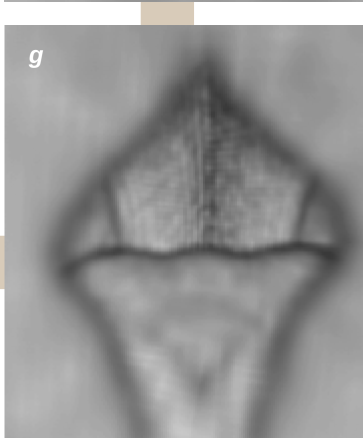






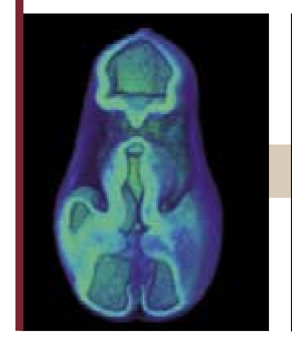


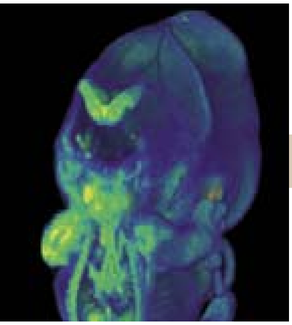


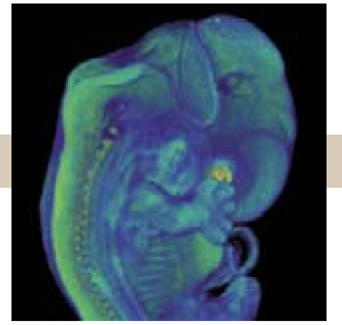


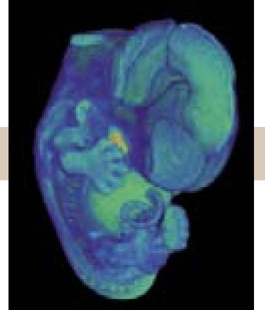
Etapa Carnegie 19 (47 días)

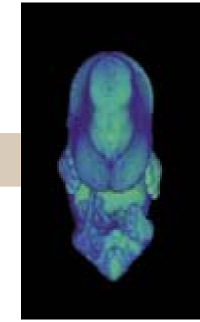
4. MERCED A TECNICAS DE PSEUDOCOLORACION asignamos colores a las imágenes de MRM para resaltar las estructuras; por ejemplo, los órganos en desarrollo de este embrión de 47 días. En las imágenes coloreadas de esta página, la retina en desarrollo brilla con un naranja amarillento. Los óvalos ámbar marcan los ganglios espinales, de donde emergen los nervios espinales; el hígado luce en el abdomen en color verde intenso, y el oído en desarrollo aparece en un resaltado color verde por encima de los hombros. Las imágenes revelan también la formación de las costillas cartilaginosas debajo del brazo y una pequeña reducción de la membrana interdigital.







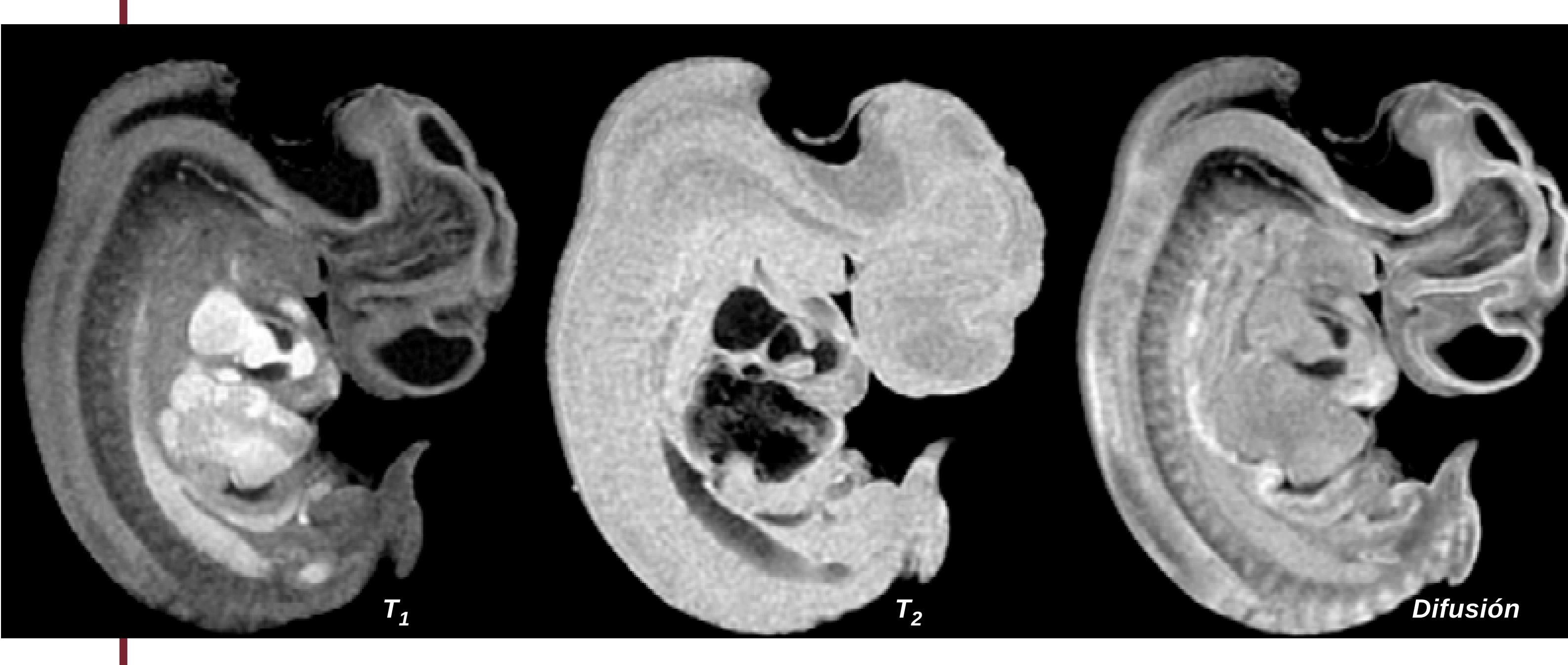




superponiendo las imágenes MRM de los cortes —128 en total y cada uno con 256 × 256 píxeles— hasta formar un cubo de 8,4 millones de voxeles. En cada voxel se representa una porción de embrión. El programa nos permite rotar la matriz de voxeles, retirar capas de ellos e incluso colorear o ajustar la escala de grises de los voxeles en función de la intensidad de la señal u otros criterios. Mediante algoritmos de ordenador, provocamos el paso de rayos de luz virtuales a través de cada matriz, procediendo de atrás adelante. Los rayos, modificados por los voxeles que encuentran en su camino, forman una imagen en la pantalla del ordenador. Podemos realizar secciones digitales de las imágenes en cualquier orientación y volver transparente la superficie de la muestra para que nos revele su estructura interna. Y podemos aislar un sistema de órganos para su inspección y medida.

El Embrión Humano Multidimensional pondrá la Colección Carnegie al alcance de los investigadores de cualquier punto del planeta. La disponibilidad de este recurso en Internet ayudará a los clínicos a descubrir defectos congénitos mediante IRM y ultrasonidos. Aportará información gráfica solvente a los laboratorios de investigación que carecen de experiencia en embriología y a las aulas de embriología básica. Y, con el procesamiento de estas imágenes, preservaremos para la posteridad una insólita e insustituible colección de embriones humanos.

Etapa Carnegie 17 (41 días)



5. EL EMBRION DE 41 DIAS que se muestra arriba, envuelto en el saco vitelino, bajo la luz de un microscopio óptico, posee tejidos diferenciados, que se pueden contemplar en estas imágenes obtenidas mediante tres técnicas de MRM diferentes: Peso-T1, Peso-T2 y Peso-difusión. Técnicas que permiten contemplar el agua de las muestras de tres maneras distintas, según la interacción entre agua y otras moléculas. (Esta característica es diferente para cada tejido.) Peso-T1 y Peso-T2 reflejan dos modos de detectar el tiempo de relajación, que mide cómo se reajustan los protones del agua después de ser perturbados por la energía de radiofrecuencia que se usa para excitarlos. En la imagen T1, los grandes vasos sanguíneos, las cámaras del corazón y el hígado aparecen destacados. La imagen T2 refleja tejidos no vasculares, pero sin contraste. La formación de imágenes por difusión aprovecha la difusión selectiva del agua en muchos tejidos; es una técnica particularmente informativa para el estudio de estructuras neurales como la corteza cerebral (*finas líneas blancas que perfilan la parte superior derecha de la imagen de la derecha*).

EL AUTOR

BRADLEY R. SMITH es profesor de investigación en el departamento de radiología del hospital clínico de la Universidad de Duke. Se vale allí de la microscopía de resonancia magnética para estudiar el desarrollo del sistema cardiovascular. Trabaja en la confección del atlas digital de embriología humana que se describe en el artículo. También ha preparado otro de embriones murinos. Doctor en anatomía por la Universidad de Duke y licenciado en arte por la Johns Hopkins, compagina la investigación con la gestión de su empresa BioImage.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATLAS OF HUMAN EMBRYOS. Raymond F. Gasser. Harper & Row, 1975.

DEVELOPMENTAL STAGES IN HUMAN EMBRYOS: INCLUDING A REVISION OF STREETER'S HORIZONS AND A SURVEY OF THE CARNEGIE COLLECTION. Roman O'Rahilly y Fabiola Müller. Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., 1987.

Las páginas de "Multidimensional Human Embryo Web" están disponibles en la ubicación www.embryo.mc.duke.edu.

Biotecnología con cianobacterias

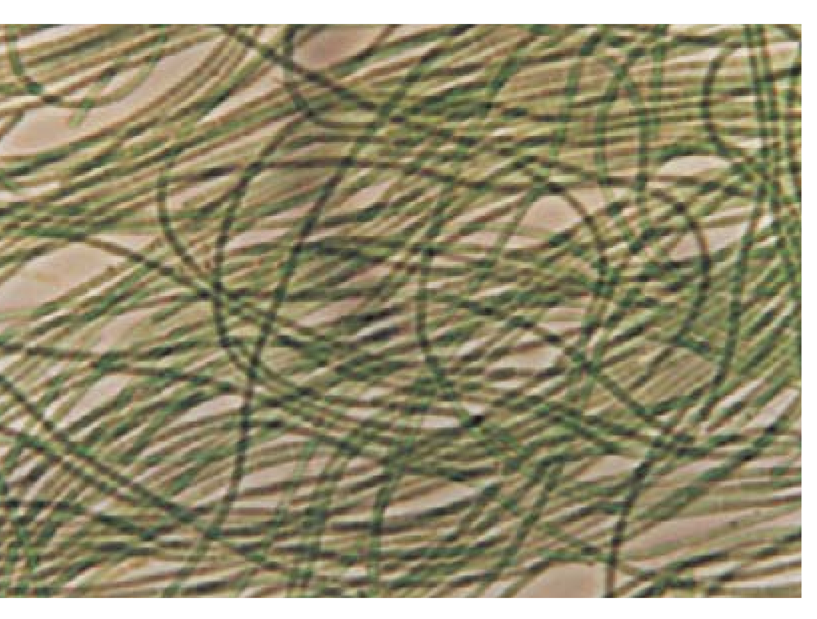
Estos seres unicelulares, responsables del cambio más drástico que ha sufrido la evolución de la vida en la Tierra, presentan una versatilidad metabólica de sumo interés en agricultura y medio ambiente

Carlos Garbisu, Alicia Blanco, Itziar Alkorta, María Jesús Llama y Juan Luis Serra

Las cianobacterias, también denominadas cianofíceas o algas verde-azuladas, se numeran entre los seres más antiguos conocidos. En depósitos calcáreos del oeste del continente australiano se hallan fósiles de más de 3000 millones de años de antigüedad. Algunas especies de estas primitivas algas microscópicas dominaron el Precámbrico, llamado por ello mismo "la era de las algas verde-azuladas". Las cianobacterias son procariotas, es decir, seres unicelulares carentes de núcleo diferenciado.

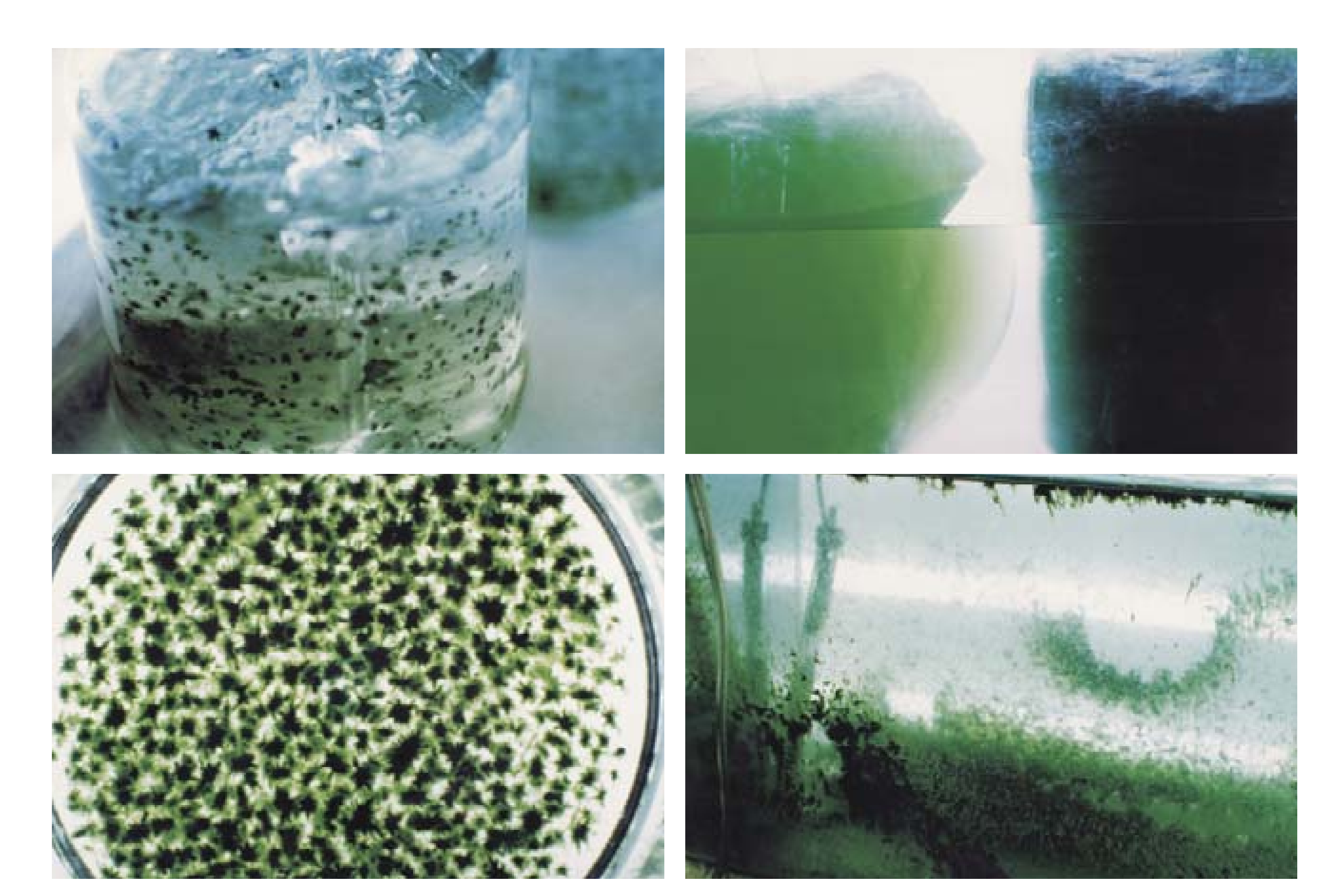
Pese a su naturaleza elemental, están capacitadas para realizar fotosíntesis oxigénica, análoga a la que acometen las plantas superiores. Por el proceso de fotosíntesis se convierte la energía lumínica en química, liberándose oxígeno procedente de la ruptura de moléculas de agua. Esta singular actividad para fotolisar el agua resultó decisiva en la evolución de la vida en la Tierra, pues la acumulación del O_2 desprendido posibilitó la aparición de una atmósfera aeróbica semejante a la actual. Además, tales procariotas fueron precursores de los cloroplastos de plantas superiores y algas eucariotas, orgánulos con los que guardan un estrecho parecido.

Al carecer de orgánulos celulares, las cianobacterias sitúan el transporte de electrones fotosintético en los tilacoides. Estas estructuras, análogas a las de cloroplastos, son invaginaciones de la membrana citoplasmática en donde se asientan los fotosistemas, una suerte de bastidores muy complejos formados por proteínas,





1. MORFOLOGIA VARIABLE de las cianobacterias, evidenciada en estas fotografías tomadas con microscopio fotónico. Las células de *Phormidium laminosum* (cianobacteria termófila filamentosa no fijadora de N_2 atmosférico) crecen formando largos filamentos constituidos por células de alrededor de 1 micrometro de diámetro y 2-3 micrometros de longitud (*izquierda*, fotografía tomada a 1000 aumentos). Puede observarse que estas células presentan una morfología uniforme, tanto en longitud como en diámetro. Por el contrario, los filamentos de *Anabaena variabilis* (cianobacteria filamentosa fijadora de N_2 atmosférico) están constituidos por dos tipos de células *(derecha)*, unas más abundantes y pequeñas (vegetativas) y otras de mayor tamaño (heterocistos) que aparecen más refringentes y en las que reside el sistema enzimático de la nitrogenasa. (La fotografía de *Anabaena variabilis*, tomada a 1250 aumentos, nos ha sido cedida por R. Lichtl del King's College, Universidad de Londres.)



2. LAS CIANOBACTERIAS PUEDEN CULTIVARSE en el laboratorio con luz artificial y en medios inorgánicos sencillos. Por fuente de carbono emplean CO_2 atmosférico o bicarbonato; extraen el nitrógeno necesario a partir de amonio, nitrato o nitrito. En ausencia de otra fuente nitrogenada, las que poseen nitrogenasa pueden fijar N_2 atmosférico. Algunas, como *Phormidium bohneri* (*arriba a la izquierda*), muestran una fuerte tendencia a autoadherirse y los filamentos forman entre sí flóculos de 2-3 milímetros de diámetro *(abajo a la izquierda)*. Sin embargo, otras filamentosas, como *Phormidium laminosum* (*arriba a la derecha*), crecen en suspensiones homogéneas en medios agitados. Al cesar la agitación, los filamentos también tienden a adherirse a las paredes del recipiente y formar agregados de diverso tamaño. Esta singular propiedad de agregarse espontáneamente en flóculos o autoadherirse a soportes es la base de la inmovilización celular por adsorción.

pigmentos fotosintéticos y otros compuestos. Los fotosistemas, de los que se distinguen el I y el II, transportan los electrones procedentes de la oxidación del agua.

Las cianobacterias captan la energía lumínica a través de ficobilisomas, complejos proteicos exclusivos de estos procariotas y algas rojas, que se disponen ordenados sobre la membrana tilacoidal. En los ficobilisomas abunda la ficocianina, proteína azulada que, junto con la clorofila *a*, verdosa, dan a las cianobacterias su coloración verde-azulada característica.

Algunas asimilan nitrógeno atmosférico (N_2). Son las que disponen de nitrogenasa, sistema enzimático que cataliza la reducción de N_2 a iones amonio (NH_4^+). Este sistema es muy sensible al O_2; para evitar la reacción del nitrógeno con el oxígeno, el sistema se encuentra confinado en el interior de células dotadas de gruesas paredes o heterocistos.

Las cianobacterias acostumbran vivir sin demasiadas exigencias nutricionales. Sólo algunas especies marinas requieren algún factor de crecimiento. Con luz pueden medrar en medios minerales, cuyas sales nitrogenadas inorgánicas y bicarbonato aprovechan para abastecerse de nitrógeno y carbono. También el CO_2 atmosférico constituye una excelente fuente de carbono. Merced a tan espartanos requerimientos y a su enorme capacidad de adaptación a condiciones ambientales cambiantes a lo largo de la evolución, las cianobacterias han colonizado casi todos los rincones del planeta.

En el laboratorio, se cultivan sin mayor dificultad en medios líquidos o agar solidificado con luz artificial o natural. Se ha creado una industria agraria en torno a estas microalgas, sobre todo en países que gozan de abundante luz solar y climatología adecuada. De entre las explotaciones a gran escala destacan por su abundancia y productividad las de *Spirulina* (ahora denominada *Arthrospira*) en zonas desérticas de California e Israel, así como en Tailandia, Japón, Taiwan, México, la India, Vietnam y China.

Antaño, las cianobacterias se cultivaban en estanques abiertos a la intemperie o en el interior de invernaderos. Hoy se emplean fotobiorreactores construidos con tubos de plástico transparente o translúcido, de 2 a 5 centímetros de diámetro, que se disponen en paralelo o helicoidalmente.

Los fotobiorreactores tubulares permiten un mejor control de las condiciones del cultivo al evitarse pérdidas de agua por evaporación y

CARLOS GARBISU, ALICIA BLANCO, ITZIAR ALKORTA, MARIA JESUS LLAMA y JUAN LUIS SERRA trabajan en la Universidad del País Vasco en Lejona. Allí Serra y Llama imparten docencia e investigan como catedráticos de bioquímica y biología molecular. Con ellos colaboran Garbisu, Blanco y Alkorta en diversas investigaciones relacionadas con las aplicaciones biotecnológicas de enzimas y cianobacterias.

estar a salvo de contaminación por otras especies. En contrapartida, son más caros que los sistemas abiertos, pueden llegar a obstruirse y, ocasionalmente, deben irrigarse con agua para mantener la temperatura.

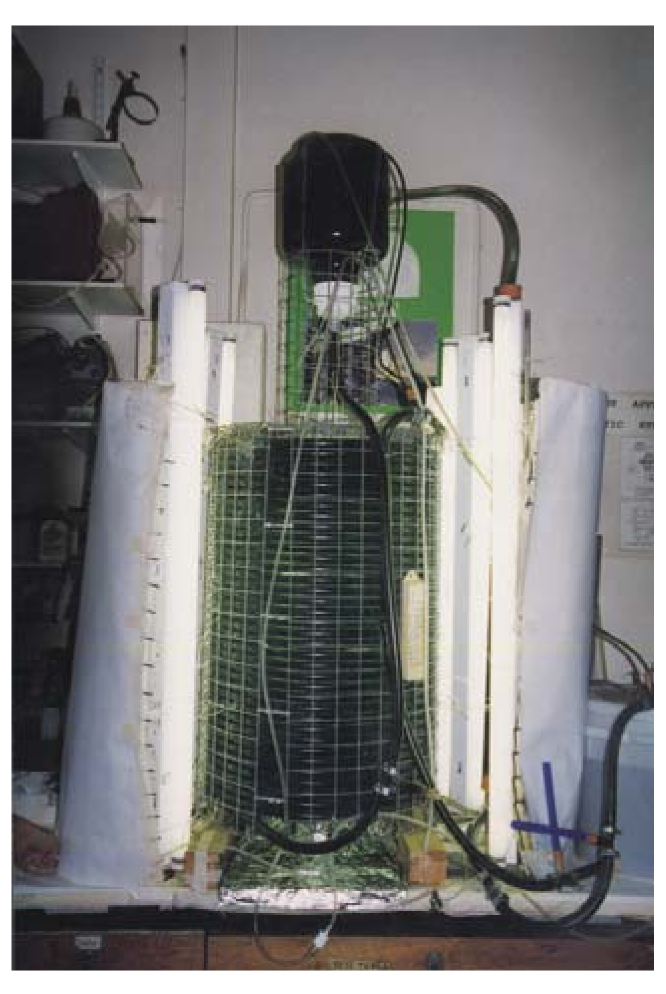
Cada vez es más habitual suministrar a los cultivos industriales, para su nutrición, el CO_2 y efluentes de la digestión anaerobia de residuos vegetales o excretas animales. Se aprovechan efluentes cuyo vertido origina siempre problemas de agresión contra el entorno.

Según parece, la biomasa de cianobacterias no productoras de toxinas constituye una excelente fuente de alimento o, aún mejor, un aditivo complementario en la dieta de animales y humanos. Desde tiempos remotos, pueblos que vivían en las cercanías de lagos cuyas aguas eran ricas en carbonato y bicarbonato sódico se alimentaban de biomasa cianobacteriana de *Spirulina platensis* y *Spirulina maxima* secada al sol. Tal parece entre los aztecas del lago Texcoco en México y algunas poblaciones norteafricanas del lago Chad. Ambas especies de *Spirulina* proliferaban sin competencia en aguas alcalinas. Si bien las más empleadas para el consumo animal son especies de *Spirulina*, se consumen también especies de *Nostoc* en el Perú y zonas de Asia Oriental y de *Microcystis* en Pakistán y la India.

El análisis bioquímico de células secas de *Spirulina* revela que un 65 % del peso está constituido por proteínas, mayoritariamente ficobiliproteínas, que contienen buenos niveles de todos los aminoácidos esenciales, salvo cisteína y metionina. Por su composición, estas proteínas resultan aptas para el consumo animal en general y el humano en particular; se venden en forma de cápsulas y comprimidos de algas. El mercado ofrece productos en cuya composición entra biomasa cianobacteriana, como alimentos diseñados para gestantes y ancianos, pan bajo en calorías, barritas de aperitivo, patés vegetales, golosinas, bebidas y un largo etcétera.

Se emplea también biomasa cianobacteriana para la alimentación de peces, crustáceos, aves de corral, ganadería y animales de compañía. Parte del éxito que acompaña a este aditivo reside en la visible mejora de coloración que promueve en los animales y en sus productos (pigmentación de carne y huevos de ave, por ejemplo), sin olvidar su efecto en la mejora de salud y fertilidad de los animales que lo consumen.

Las microalgas contienen colorantes naturales en abundancia, causantes del brillo de los animales que se nutren de ellas; poseen clorofila *a* (verde), ficocianina y aloficocianina (azules) y carotenoides (β-caroteno, amarillo-rojizo, y xantofilas, ama-





rillas). Además, algunas especies presentan cantidades menores de ficoeritrina (rosa) o ficoeritrocianina (violeta). Las ficocianinas se emplean para teñir helados, dulces, chicles, refrescos y productos lácteos. En biomedicina, sirven como sondas fluorescentes en sustitución de los marcadores radiactivos. Por su parte, la industria agroalimentaria explota la facilidad con que *Nostoc, Anabaena* y *Chroococcus* secretan polisacáridos al medio para acondicionamiento de tierras de labor.

Algunas cianobacterias constituyen una fuente excelente de aminoácidos (aspartato, arginina y glutamato), vitaminas, enzimas de restricción, antibióticos β-lactámicos, poli-β-hidroxialcanoatos y ácidos grasos poliinsaturados (γ-linolénico), entre una extensa lista de compuestos de interés económico.

Muchas cianobacterias tienden a adherirse espontáneamente a la superficie. Otras forman entre sí agregados celulares que floculan. En esta propiedad singular se ha fundado el desarrollo de las técnicas de inmovilización celular por adsorción.

La aplicación biotecnológica de células inmovilizadas presenta numerosas ventajas sobre la que emplea células en estado libre. Así, una mayor facilidad para retener la biomasa en el reactor y posibilidad de reutilizarla en el proceso. Las células inmovilizadas resisten entornos más agresivos, desde el punto de vista químico y físico.

La inmovilización provoca cambios significativos en la morfología y metabolismo celular. Por ejemplo, la adsorción sobre esponjas de poliuretano de la cianobacteria heterocistada *Anabaena azollae* origina que en sus filamentos aparezcan heterocistos con mayor frecuencia, lo que a su vez conlleva que dispongan de más nitrogenasa y, en consecuencia, mayor capacidad para fijar N_2.

Pero la eficacia del proceso fotosintético es muy baja. En la mayoría de las plantas cultivadas raramente supera el 1 % al cabo del año. Ahora bien, ese bajo rendimiento puede aumentarse con métodos de mejora genética de las microalgas y si sólo se cultivan las que presentan mayor productividad.

3. CULTIVO INDUSTRIAL DE CIANOBACTERIAS en fotobiorreactores tubulares o en estanques abiertos. Los tubulares presentan ventajas frente a los abiertos, aunque resultan mucho más caros. La fotografía de la izquierda corresponde a un cultivo en el laboratorio de *Spirulina platensis* en un fotobiorreactor tubular en espiral (Biocoil®) de 25 litros de capacidad. (Fotografía cedida por D. O. Hall, King's College, Universidad de Londres.) La fotografía central corresponde a un cultivo de *Spirulina platensis* en un fotobiorreactor tubular de 1000 litros situado a la intemperie en la Universidad Ben Gurion en Sede Boker, Israel. (Fotografía cedida por A. Vonshak, de la misma institución.) La fotografía de la derecha corresponde a un cultivo en estanques abiertos a la intemperie en el Instituto de Microbiología de Trebon, República Checa. (Fotografía cedida por K. K. Rao, King's College, Universidad de Londres.)



Con ese fin se han diseñado sistemas biomiméticos, que remedan el funcionamiento de los procesos naturales. Los sistemas captan y convierten la energía lumínica, sin que aparezcan efectos secundarios contraproducentes. Se emplean cloroplastos enteros o sus membranas fotosintéticas, junto con transportadores de electrones naturales o artificiales y catalizadores adecuados (enzimas o sus análogos sintéticos).

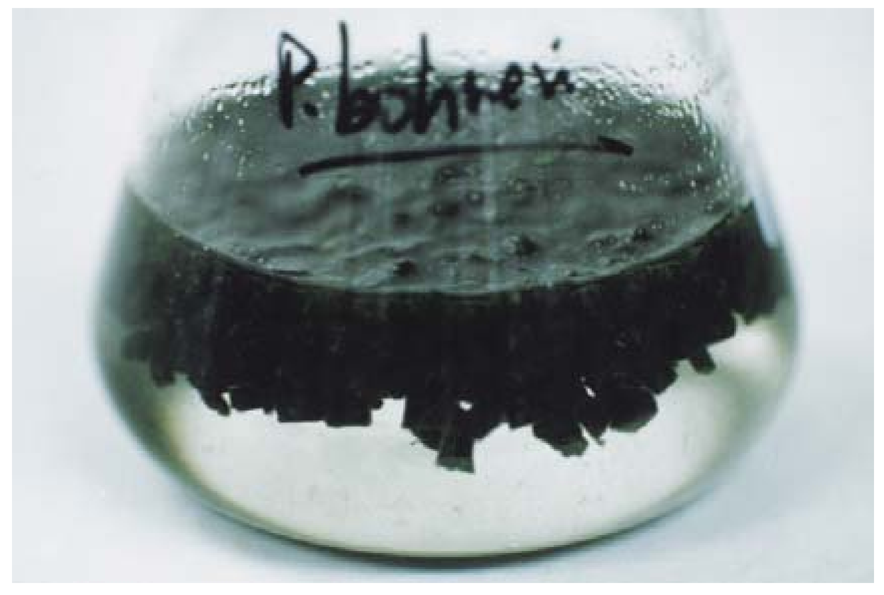
Pero los sistemas biomiméticos son inestables cuando se les somete a iluminación continua, debido a la fotooxidación irreversible de algunos de sus componentes y a la fotoinhibición del fotosistema II. La estabilidad aumenta con la sustitución de membranas fotosintéticas por cianobacterias intactas.

En el laboratorio de David O. Hall, del King's College de la Universidad de Londres, se ha logrado fotoproducir combustibles (H_2) y diversos compuestos químicos reducidos ($NADPH_2$) por cianobacterias heterocistadas (*Anabaena azollae* y *Mastigocladus laminosus*), adsorbidas sobre esponjas de poliuretano y polivinilo, o atrapadas en alginato cálcico. Las cianobacterias se sirven del agua como fuente de electrones para la producción de H_2.

La fotoproducción de H_2 por cianobacterias fijadoras de N_2 atmósferico se debe también a la actividad de la nitrogenasa, enzima que, además de reducir N_2 a NH_4^+, presenta actividad hidrogenasa. Con la nitrogenasa colabora otra hidrogenasa citoplásmica que cataliza una reacción reversible, que también libera H_2. Una parte significativa de este gas se oxida por la actividad irreversible de otra hidrogenasa unida a membrana. El empleo de mutantes que carecen de esta última enzima mejora la eficacia en la fotoproducción de H_2. También, la adsorción de *Anabaena azollae* a esponjas duplica su capacidad fotoproductora de H_2.

Los primeros sistemas biomiméticos con cianobacterias que se desarrollaron para fotoproducir NH_4^+ a partir de nitrato o N_2 requerían un inhibidor de la glutaminasintetasa (GS), la L-metionina-D,L-sulfoximina (MSX). De lo contrario, la actividad de esta enzima, junto con la de la glutamato sintasa incorporan el NH_4^+ en esqueletos hidrocarbonados. Con esta estrategia se consigue que la célula excrete al exterior, convertido en NH_4^+, hasta el 40 % del N_2 que fija.





4. LA ADHESION ESPONTANEA a un soporte constituye una característica de muchas cianobacterias que medran en su medio natural. Si a un cultivo de células se le suministran láminas o pedazos de esponjas translúcidas de poliuretano o polivinilo, por ejemplo, las células se adhieren a la esponja y crecen en el interior de sus poros en una tasa similar a la descrita en las formas libres. La fotografía superior muestra esponjas sin colonizar (claras) y colonizadas (oscuras) por filamentos de *Phormidium bohneri.* Hasta que no se satura la capacidad de la esponja para retener biomasa, no aparecen filamentos de células libres en el medio (*fotografía inferior*).

Se busca ahora la obtención de mutantes de cianobacterias fijadoras de N_2 que carezcan de glutamina sintetasa y excreten NH_4^+ sin necesidad de recurrir a inhibidores. Una vez más, la adsorción de *Mastigocladus laminosus* y *Anabaena azollae* por esponjas de polivinilo incrementa de 10 a 40 veces sus capacidades para fotoproducir NH_4^+. Este aumento se debe a los cambios que en la permeabilidad de la membrana plasmática induce la propia inmovilización, al interaccionar la esponja con la superficie celular.

Una de las aplicaciones más prometedoras que las cianobacterias fijadoras de N_2 presentan en agricultura es su empleo como biofertilizantes. Nada insólito, por otro lado. Desde hace siglos los arrozales asiáticos han mantenido su productividad sin emplear fertilizantes gracias a la presencia de cianobacterias heterocistadas que medran espontáneas en las aguas pantanosas. También es práctica arraigada en la India, China y Filipinas el cultivo de cianobacterias en estanques, que se vierten luego a los arrozales para aumentarles su fertilidad.

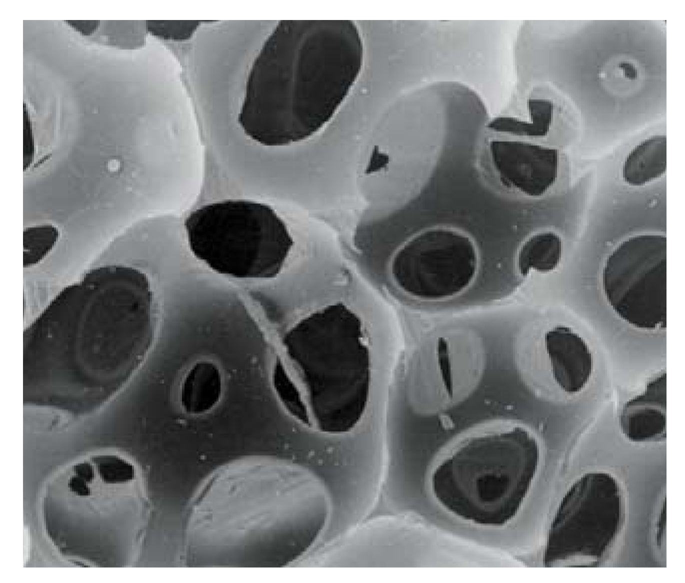
Se sabe, asimismo, que la presencia del helecho acuático *Azolla* fomenta el rendimiento de los arrozales. *Anabaena azollae* es una cianobacteria que vive simbióticamente en el helecho, al que aporta el amonio fijado a partir de N_2 atmosférico. (La simbiosis constituye una forma de interacción entre especies distintas que reporta beneficios a ambas.) Cuando se aíslan del helecho y posteriormente se adsorben en esponjas de poliuretano, las cianobacterias excretan sin cesar amonio al medio y fertilizan las plántulas de arroz.

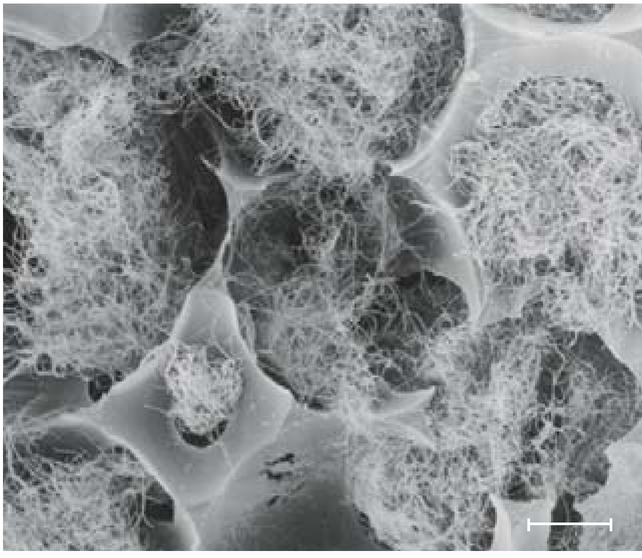
La expansión de las explotaciones agrícolas y ganaderas intensivas ha dejado por secuela elevadas concentraciones de nitratos en suelos y aguas. Lechugas, espinacas y apio contienen cantidades considerables de nitrato, anión que provoca cianosis en lactantes. La cianosis se origina por la conversión de hemoglobina en metahemoglobina, proteína ésta que posee menos capacidad para transportar O_2 que aquélla. De hecho, es el nitrito procedente de la reducción del nitrato por la microflora intestinal el causante directo de la formación de metahemoglobina. Además, las nitrosaminas, compuestos que se producen al reaccionar el nitrato con aminas presentes en el estómago, son agentes cancerígenos con propiedades mutagénicas y teratogénicas (inducen malformaciones en embriones).

El exceso de fósforo en forma de fosfatos pasa a ser otro problema para la salud del medio. Sin resultar directamente tóxicos para el hombre, una concentración de fosfatos desmesurada altera el ecosistema de ríos y lagos con la eutrofización (exceso de nutrientes) que se producen en sus aguas.

En nuestro laboratorio hemos empleado cianobacterias para descontaminar aguas potables que contenían altos niveles de nitratos y fosfatos y que procedían de campos sometidos a un abonado excesivo con fertilizantes nitrogenados. Para ello, cultivábamos los procariotas adsorbidos en esponjas translúcidas de poliuretano, dejando que las células agotaran esos nutrientes "contaminantes".

Trabajamos con especies de la cianobacteria no fijadora de N_2 *Phormidium*. Conocíamos sus mecanismos





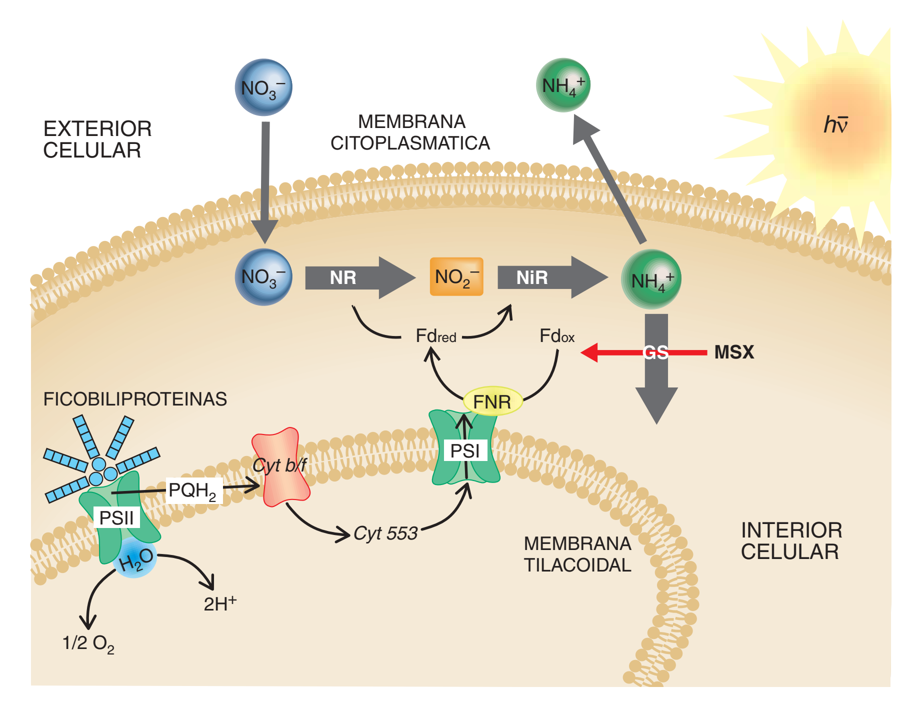
5. ESPONJA DE POLIURETANO antes y después de ser colonizada por filamentos de *Phormidium bohneri*. Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido muestran la estructura de una esponja de densidad 47 kg/m^3 antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de su colonización. Las células terminan por ocupar el interior de los poros formando agregados de filamentos muy compactos. La barra inferior equivale a una longitud de 250 micrometros.

de asimilación del nitrato. Al igual que otras cianobacterias, *Phormidium* tiende a adherirse a las superficies, provocando su autoinmovilización. En reactores de diverso diseño y de hasta 100 litros de capacidad, descontaminamos de nitrato aguas que contenían hasta 200 miligramos de este ion por litro. Los fotobiorreactores funcionaban en modo continuo o discontinuo, en ciclos de 12 horas de luz seguidas de 12 horas de oscuridad.

El nitrato eliminado se convertía en más biomasa cianobacteriana, que seguía adsorbida al poliuretano del fotobiorreactor hasta alcanzar la máxima carga celular que la esponja soportaba. Cuando se sobrepasaba el límite de biomasa adsorbida, aparecían células libres en el medio que servían, a su vez, para inocular otros reactores con esponjas nuevas que se conectaban en serie a la salida del primero.

La cadena de fotobiorreactores operaba, al menos, durante varios meses si periódicamente se eliminaba el exceso de biomasa acumulada y se sustituían las esponjas saturadas de células por otras nuevas. La biomasa adsorbida en las esponjas se liberaba por agitación mecánica. Podemos destinarla entonces a engorde de animales, extracción de productos de alto valor añadido o adsorbente para la descontaminación de iones de metales pesados de aguas.

Muchos iones metálicos son componentes esenciales de sistemas biológicos. Pero eso no impide su toxicidad potencial. Tanto las funciones



6. FOTOPRODUCCION DE AMONIO en presencia de inhibidores que impiden su incorporación en esqueletos carbonados. El esquema ilustra un detalle del interior de una cianobacteria no fijadora de N_2 que utiliza nitrato del medio exterior y lo reduce intracelularmente a iones amonio (NH_4^+) por la actividad secuencial de la nitrato reductasa (NR) y nitrito reductasa (NiR), enzimas que utilizan ferredoxina (Fd) reducida por la cadena de transporte de electrones fotosintética. Los iones amonio se liberan al exterior, dado que una de las enzimas responsables de su incorporación neta al 2-oxoglutarato para dar L-glutamato (la glutamina sintetasa, GS) está irreversiblemente inhibida por un análogo estructural del L-glutamato (la L-metionina-D,L-sulfoximina, MSX). Por su parte, las cianobacterias con nitrogenasa toman N_2 atmosférico y lo reducen hasta amonio, ion que se libera al medio si se bloquea la GS con MSX u otro inhibidor; o mejor aún, si se emplean mutantes privados de esta actividad enzimática. En el esquema no se han dibujado las envolturas celulares ni los sistemas para el transporte de nitrato y amonio sitos en la membrana citoplasmática.






7. LA BIOFERTILIZACION es una de las aplicaciones que las cianobacterias presentan en agricultura. *Anabaena azollae* es una cianobacteria endosimbiótica del helecho acuático *Azolla*, al que aporta el amonio procedente de la fijación del N_2 atmosférico. Las cianobacterias aisladas del helecho y adsorbidas en esponjas de poliuretano excretan continuamente amonio al exterior, fertilizando las plántulas de arroz. Las fotografías muestran experimentos realizados en el laboratorio y en arrozales piloto en Coimbatore, la India. Se puede comparar el aspecto de plántulas cultivadas en un medio rico en nutrientes (*arriba a la izquierda*) con las mantenidas en uno sin fuente nitrogenada y fertilizadas por *A. azollae* adsorbida en esponjas de poliuretano (*abajo a la izquierda*). Las fotografías de la derecha muestran arrozales fertilizados con esponjas de poliuretano colonizadas por *Anabaena azollae* (*arriba*) y parcelas fertilizadas en diversas condiciones (*abajo*). (Fotografías cedidas por S. Kannaiyan, Universidad Agraria Tamil Nadu de Coimbatore.)

biológicas como los mecanismos de toxicidad que presentan estos elementos se deben a su carga eléctrica, es decir, a su capacidad de coordinarse con otras moléculas y posesión de múltiples estados de valencia. Las cianobacterias eliminan iones metálicos del medio por mecanismos fisicoquímicos, como la adsorción a las envolturas celulares (proceso de biosorción), o dependientes de su actividad metabólica, como el transporte. Las células acumulan entonces iones metálicos de ambientes donde se encuentran muy diluidos.

La contaminación de ecosistemas por iones metálicos está recibiendo una atención creciente. De acuerdo con la regulación vigente en la Unión Europea, la cantidad de metales que se viertan en aguas y efluentes deberá ser inferior a 1 miligramo por litro. Para llevar la norma a cumplimiento, se han desarrollado técnicas de tratamiento de aguas contaminadas con iones metálicos: precipitación química, intercambio iónico, adsorción sobre carbón activo y electrodiálisis, entre otras.

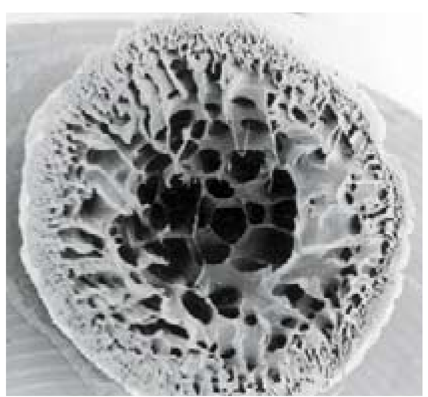
Los métodos químicos y electroquímicos resultan, sin embargo, ineficaces o muy caros cuando la concentración del ion metálico es inferior a 10 miligramos por litro, como ocurre en muchos efluentes industriales.

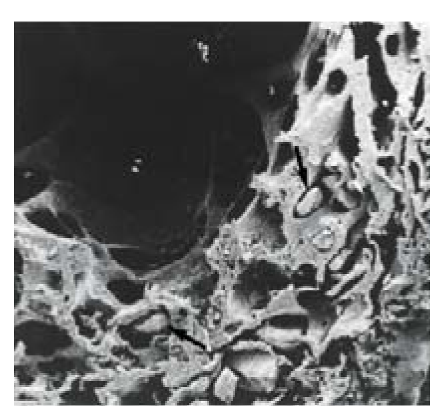
A comienzos de los años noventa iniciamos una serie de estudios encaminados a explorar el aprovechamiento de la biomasa no viable de algunas cianobacterias como biosorbente de iones metálicos. Cultivamos *Phormidium laminosum* en medio mineral y, después de secar las células, las atrapamos en esferas de polisulfona y resinas epoxi, materiales poliméricos inertes. Comprobamos que la biomasa inmovilizada en estas esferas microporosas adsorbía eficazmente Fe(II), Cr(III), Zn(II), Cu(II), Ni(II), Cd(II) y Pb(II) de aguas modelo. Más tarde, el metal adsorbido se recuperaba cuantitativamente lavando las esferas con disoluciones ácidas.

Reutilizamos la biomasa inmovilizada en sucesivos ciclos de biosorción y elución. Hemos comprobado que la biomasa atrapada en polisulfona puede volver a aprovecharse, sin merma de eficacia, en 10 ciclos consecutivos por lo menos. Se trata, pues, de un biosorbente idóneo para la descontaminación de metales pesados en aguas residuales.

Dentro de las aplicaciones ambientales más recientes de las cianobacterias destacan las que emplean estos organismos para degradar







8. ESFERAS MICROPOROSAS de polisulfona con biomasa atrapada en su interior empleadas para la biosorción de iones de metales pesados. Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido muestran la superficie rugosa y microporosa de una esfera de 2,3 milímetros de diámetro intacta (*arriba*) o seccionada transversalmente (*centro*). En la ampliación (*abajo*) se pueden observar los agregados de biomasa (*flechas*).

contaminantes orgánicos disueltos en agua. Así, el grupo de Carl E. Cerniglia, del Centro Nacional de Investigaciones Toxicológicas de Jefferson, en Arkansas, ha demostrado que *Oscillatoria* sp. y *Agmenellum quadruplicatum* pueden degradar los hidrocarburos fenantreno y naftaleno. Otros trabajos sugieren que ciertas cianobacterias del crudo petrolífero degradan *n*-alcanos. El fenol y algunos de sus derivados también pueden ser degradados por *Spirulina maxima*, *Anabaena cylindrica* y *Phormidium foveolarum*.

Por su parte, el equipo encabezado por C. Peter Wolk, de la Universidad estatal de Michigan, ha logrado que células de *Anabaena* sp. y *Nostoc ellipsosporum* degraden γ-hexaclorociclohexano, pesticida conocido como Lindane. Introdujeron en el genoma cianobacteriano genes de la bacteria *Pseudomonas paucimobilis* que codifican enzimas con actividad degradativa. Este trabajo, pionero en su campo, abre nuevas perspectivas en el empleo de cianobacterias manipuladas genéticamente y hospedadoras de genes bacterianos como agentes capaces de degradar contaminantes orgánicos disueltos en agua. Si esta estrategia confirma su validez, y la unimos a las ya enumeradas ventajas que las cianobacterias presentan sobre las bacterias heterotróficas, cabrá confiar en el protagonismo que estos nuevos agentes descontaminantes adquieran en un futuro próximo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARE THERE COMMERCIAL PROSPECTS FOR SOLAR ENERGY? D. O. Hall. *New Journal of Chemistry*, volumen 11, n.º 2, páginas. 179-186, 1987.

ALGAL AND CYANOBACTERIAL BIOTECHNOLOGY. Dirigido por R. C. Cresswell, T. A. V. Rees y N. Shah. Longman Scientific & Technical, 1989.

INORGANIC NITROGEN AND PHOSPHATE REMOVAL FROM WATER BY FREE-LIVING AND POLYVINYL-IMMOBILIZED *PHORMIDIUM LAMINOSUM* IN BATCH AND CONTINUOUS-FLOW BIOREACTORS. C. Garbisu, D. O. Hall, M. J. Llama y J. L. Serra en *Enzyme and Microbial Technology*, volumen 16, páginas. 395-401, mayo de 1994.

SORPTION OF HEAVY METALS TO *PHORMIDIUM LAMINOSUM* BIOMASS. M. A. Sampedro, A. Blanco, M. J. Llama y J. L. Serra en *Biotechnology and Applied Biochemistry*, vol. 22, páginas. 355-366, 1995.

ALGAE. AN INTRODUCTION TO PHYCOLOGY. C. van den Hoek, D. G. Mann y H. M. Jahns. Cambridge University Press, 1995.

ESTRELLARSE

Stefan Thomke, Michael Holzner y Touraj Gholami



1. LA COLISION FRONTAL SIMULADA de un BMW con una barrera a 64 kilómetros por hora da un resultado (*arriba*) similar al de un choque frontal real de un prototipo del mismo vehículo a igual velocidad (*derecha*). Las pruebas se realizaron en el Centro de Investigación e Ingeniería de BMW en Munich.

En los países desarrollados, donde el automóvil se usa a diario, el conductor no suele reparar en los riesgos que corre. Cierto es que, en los últimos veinte años, múltiples factores han doblado la seguridad del viaje: almohadillas neumáticas (*airbags*), cinturones de seguridad y otras mejoras del diseño, unidos a la creciente madurez del conductor medio, han rebajado la siniestralidad.

Pero el coche continúa siendo un medio de transporte arriesgado. La carretera se cobra miles de víctimas mortales al año y deja incapacitados a decenas de miles. Los accidentes de automóvil constituyen la causa principal de muerte entre jóvenes de 6 a 27 años. Además del trágico tributo en vidas humanas, la repercusión económica es enorme, cifrada en miles de millones de pesetas.

Las medidas de refuerzo de la seguridad adoptadas en el diseño de los coches son la razón primordial de la disminución de la siniestralidad desde mediados de los ochenta. Mas las presiones competitivas sobre la industria del automóvil obligan a la mayoría de las empresas a economizar tiempo y dinero en el desarrollo de nuevos vehículos. En pocas palabras, mientras usuarios y gobiernos piden coches más seguros, se recortan los presupuestos para proyectos.

Muchos fabricantes encuentran en la informática una salida a este dilema. Es cada vez más frecuente que los tradicionales ensayos —en los que se estrellan coches equipados contra muros de hormigón— se sustituyan por choques "virtuales", con ordenadores de alto rendimiento que simulan una colisión. Con el vertiginoso aumento de la velocidad de los ordenadores y el gran desarrollo de la programación, experimentados en los últimos diez años, la simulación

EN AUTOMOVIL

Crece el uso de simulaciones informáticas de accidentes para producir con más rapidez y economía coches seguros



de los choques ha progresado hasta alcanzar un alto grado de confianza en sus resultados. La irrupción informática está revolucionando los métodos de diseño.

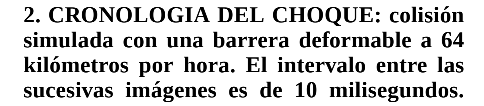
Se ha ahorrado lo indecible en tiempo y dinero. Para la prueba al choque tradicional, hay que empezar por fabricar un prototipo de vehículo; ello nos lleva de cuatro a seis meses de trabajo y cuesta decenas de millones de pesetas. El prototipo ha de equiparse con maniquíes, que portan sensores electrónicos para registrar la aceleración del choque; valen hasta diez millones cada muñeco. El choque lo captan diversos instrumentos, incluidas cámaras de alta velocidad. Pero es frecuente que los cristales y otros restos del impacto obstruyan parte de la visión, y puede ocurrir que el golpe lance los maniquíes hacia regiones interiores no visibles para las cámaras. Por eso las películas de colisiones suelen dar muy poca orientación para mejorar la ingeniería del proyecto.

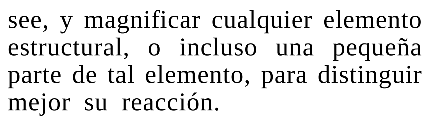
Pero cabe concebir y programar una prueba por simulación en ordenador, que dure días o semanas, cuyo principal costo serían los salarios de los encargados de la simulación. Por supuesto, los ordenadores típicos serían o estaciones de trabajo de máximo nivel (valoradas en decenas de millones) o supercomputadores que cuestan cientos de millones de pesetas. Pero estos ordenadores no se desechan en cada nuevo golpe como los prototipos de vehículos, sino que se utilizan una y otra vez, amén de hallar nuevas aplicaciones en la empresa.

Quizá lo más importante de las simulaciones informáticas sea que permiten a los ingenieros seguir pautas de trabajo únicas. Por ejemplo, en un plazo relativamente corto realizar toda una serie de pruebas orientadas a mejorar la estructura de una pieza —tal como uno de los montantes que unen el techo con el chasis, bajo las ventanillas— que ejerzan una influencia determinante en la capacidad de resistir choques del vehículo entero. También puede "reproducirse" una simulación con la lentitud que se de-






2. CRONOLOGIA DEL CHOQUE: colisión simulada con una barrera deformable a 64 kilómetros por hora. El intervalo entre las sucesivas imágenes es de 10 milisegundos.


see, y magnificar cualquier elemento estructural, o incluso una pequeña parte de tal elemento, para distinguir mejor su reacción.

Tales capacidades, además de generar una profusión de detalles útiles, permiten sacar el máximo partido de los costosos ensayos de colisión de prototipos. Tras una buena serie de colisiones simuladas, se habrán reducido mucho las posibilidades de que una prueba de choque real arroje pobres resultados y requiera otro ciclo de diseño y nuevas pruebas.

Aunque por su economía y otras ventajas las simulaciones informáticas ocupen ya un lugar destacado en el proceso de proyecto y ejecución, no es previsible que acaben sustituyendo, sino más bien complementando, las pruebas de choque clásicas. Los continuos avances en la potencia de proceso de los ordenadores han permitido a los programadores alcanzar un nivel notable de fidelidad y detalle, pero las simulaciones están libres de limitaciones intrínsecas. Una fundamental es que cada simulación sólo puede responder una pregunta específica, tal como: ¿qué efecto tendría el adelgazamiento en el 7 % de un montante ante un impacto lateral de 50 kilómetros por hora?

El tipo de cuestiones que puede responder la simulación está condicionado por la gama de fenómenos susceptibles de modelación. A causa de su duración y complejidad, es muy difícil hoy simular y predecir lo que sucede cuando el coche derrapa. El patinazo puede durar hasta tres segundos, en vez de los 100 a 150 milisegundos de un golpe más clásico, y prolongar tanto tiempo la simulación requiere una enorme potencia de proceso. Por otra parte, resulta difícil pronosticar cuál será el comportamiento del vehículo, pues depende del rozamiento del pavimento y de otros factores. También resulta casi imposible determinar por ordenador qué partes del coche corren riesgo de incendiarse en caso de accidente.

Otro motivo de que no pierdan vigencia las pruebas de choque de prototipos en el próximo futuro es que los organismos estatales de seguridad vial todavía necesitan obtener datos de tales pruebas. En los EE.UU. la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico (NHTSA) colabora con otras organizaciones en la redacción de normas a las que deben atenerse los fabricantes. En Europa las directrices específicas son algo diferentes, pero el proceso legislativo es similar; la Comisión económica para Europa de las Naciones Unidas dicta normas para sus estados miembros, que la Unión Europea puede luego adoptar, y también a la inversa.

Según estas normas, los fabricantes deben registrar datos de los impactos de prototipos en las tres principales categorías de accidentes: golpe frontal, trasero y lateral. Se detallan las circunstancias, por ejemplo, si fue colisión frontal con pared de hormigón a no más de 48 kilómetros por hora. Lo típico es que estas pruebas comiencen por aplicarse a los prototipos en la fase temprana de desarrollo, y más tarde las utilicen los organismos oficiales para muestrear la seguridad de los vehículos fabricados. A menudo, los fabricantes añaden a los ensayos normales de impacto en prototipos pruebas de su cosecha, más exigentes.

Los requisitos oficiales toman como base las estadísticas de accidentes. De todos los casos registrados en EE.UU. en 1997 en coches de turismo, hubo un 45,2 % de choques frontales, un 33,9 % laterales y un 19,6 % de golpes traseros. Además, la mortalidad fue proporcionalmente mucho mayor en las colisiones frontales: el 61,9 % del total de los accidentes fatales, mientras que sólo llegaba al 25,2 % en choques laterales y al 5,5 % en los traseros. Estas cifras hablan por sí mismas. Se ha puesto, por tanto, el máximo interés en los choques frente a frente. El uso obligatorio del cinturón de seguridad y la mayor difusión de las almohadillas neumáticas responden a esta preocupación. Sin embargo, en los últimos años los fabricantes han prestado más atención a reforzar la protección de los pasajeros cuando el vehículo sufre impactos laterales, generalmente mediante el uso de almohadillas neumáticas y un nuevo diseño de los montantes u otra pieza clave de la estructura lateral.

Para entender cómo utilizan los diseñadores los datos sobre colisiones se necesitan ciertos conocimientos de los fenómenos físicos puestos en juego. Un accidente de automóvil consiste fundamentalmente en una transformación de energía: la energía cinética del vehículo en marcha se transforma en energía deformante durante el accidente. La característica que más influye es la velocidad del vehículo en el momento del choque, dado que la energía absorbida en el impacto crece con el cuadrado de la velocidad (un choque a 90 kilómetros por hora es cuatro veces más violento que un choque a 45).

El peso constituye otro factor esencial. Si bien incide negativamente en el choque de un solo vehículo, puede ser favorable si en el accidente participan varios coches. Cuando colisionan vehículos pesados y ligeros, suelen salir mejor librados los pasajeros de los coches pesados, salvo en el caso de que los vehículos ligeros estén construidos con materiales más resistentes que los pesados en las zonas más expuestas al impacto. De hecho, se tropieza aquí con una desafortunada situación: las pruebas con prototipos que prescribe el gobierno requieren que la indemnidad

STEFAN THOMKE, MICHAEL HOLZNER y TOURAJ GHOLAMI coincidieron hace tres años en el Centro de Investigación e Ingeniería de BMW en Munich. Thomke, profesor en Harvard, dejó el laboratorio del centro de BMW para dedicarse a la gestión de investigación y desarrollo en industrias de automoción, electrónicas y farmacéuticas. Holzner dirige en BMW el departamento de simulación de colisiones, donde Gholami ocupa un puesto de responsabilidad.





al choque se evalúe en solitario, pese a que en el 63% de todos los accidentes fatales intervienen dos o más vehículos. Si los fabricantes tuviesen que reducir al mínimo los daños a todos los vehículos involucrados en un choque —por ejemplo, alcanzando compromisos entre el peso y la rigidez— los coches de servicios deportivos y otros vehículos de pasajeros más o menos pesados se construirían con materiales algo más flexibles. Sin duda, algunas compañías han empezado ya a incorporar este principio a sus diseños.

En esencia, los daños personales que origina un accidente pueden achacarse a impactos sobre el cuerpo de objetos —el volante, por ejemplo—, que producen contusiones o heridas externas, o bien a la fuerte desaceleración sufrida en el choque, que produce lesiones, fracturas óseas y desgarros de órganos acompañados por hemorragias internas. En las pruebas de impacto sobre prototipos, los sensores de los modelos registran la aceleración máxima; cuanto menor sea ésta, mejor será el comportamiento ante la colisión y, por tanto, habrá menos riesgo de muerte o lesiones graves.

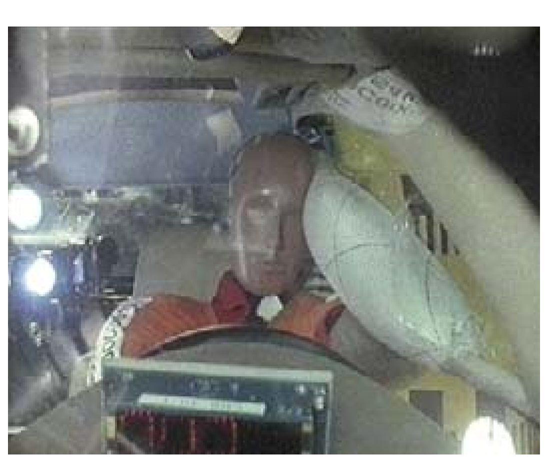
La desaceleración es consecuencia de la cantidad de movimiento transferida entre el vehículo y todo lo que entra en colisión con él. A efectos de seguridad, uno de los factores destacados es la velocidad con la que se transfiere al vehículo dicha cantidad de movimiento; esto a su vez depende de muchas variables o parámetros de diseño. Por nombrar unos pocos, la resistencia y rigidez del material del vehículo, sus soportes estructurales, la posición del motor y la rigidez de la columna de dirección, susceptibles todos de influir en la gravedad de los daños sufridos en un choque.

Los programas informáticos que modelizan todos estos parámetros se basan en el análisis de elementos finitos. Según esta técnica algorítmica, los programadores representan cada pieza de la estructura por un grupo de elementos finitos, cada uno de los cuales consiste en un polígono que lleva asociada una descripción matemática de sus propiedades físicas y materiales, como son la rigidez y la resistencia a la tracción. En una prueba de colisión, el modelo completo consta de varios componentes: el cuerpo del vehículo, sus asientos, el motor y los pasajeros; cada uno de ellos se descompone a su vez en otros. El vehículo, por ejemplo, comprende los paneles de las puertas, aletas, ventanillas, montantes y otras piezas, cada una correspondiente a un grupo de elementos finitos.

Cuantos más elementos finitos incorpore el modelo, de manera más fiel simulará la realidad. Los técnicos utilizan estaciones de trabajo del máximo nivel o supercomputadores, que tienen potencia suficiente para simular un modelo de vehículo equipado con 200.000 o 300.000 elementos finitos. Los asientos, el motor y los pasajeros pueden añadir otros 100.000 o 200.000 polígonos. Las limitaciones en la potencia del ordenador han obligado a modelizar los pasajeros como figuras rígidas y unidas, bastante parecidas a los maniquíes empleados en las pruebas de colisión; esta norma se sigue aplicando en la industria. Pero en medios universitarios ya se está aprovechando la mayor velocidad de proceso de los ordenadores para simular con más realismo a los ocupantes, distinguiendo tejidos blandos y huesos. La importancia de este trabajo estriba en que, si continúan los avances en potencia de proceso, será sólo cuestión de tiempo el llegar a calcular por simulación la aceleración que sufren distintos órganos del cuerpo durante una colisión. La superioridad de estas simulaciones será evidente, puesto que los acelerómetros fijados en distintos puntos de los maniquíes no pueden predecir cómo va a moverse un órgano del cuerpo, suspendido en un medio en gran parte fluido.

Para generar los miles de elementos finitos que comprende un modelo, se toman datos de los programas de diseño informatizado que se crearon al iniciarse el programa de desarrollo. A cada elemento se asocian las propiedades físicas (masa, densidad, rigidez y otras) y las condiciones de contacto relativas a los elementos circundantes.

Al vincular entre sí los elementos que componen el modelo, incluidos los módulos de pasajeros, los técnicos llevan a cabo un cuidadoso ajuste para asegurar que la distribución de las masas y el centro

3. PRUEBA DE CHOQUE EN PROTOTIPO, que fue grabada por cámaras fijas de alta velocidad. Las imágenes del impacto lateral ofrecen los mejores resultados visuales posibles, al no estar obstruidos por restos del golpe. La almohadilla neumática se abre en el choque, evitando que la cabeza del maniquí golpee el lateral del coche.





4. LA CRONOLOGIA DEL CHOQUE continúa, aplastando el morro del vehículo en unos 70 centímetros. Una contracción mayor podría lanzar el motor al compartimento de pasajeros.

de gravedad resultante se acerquen lo más posible a la realidad. El modelo terminado es un complejo paquete de programas que calcula cómo se transforma la energía cinética en deformaciones, fuerzas de aceleración y otros parámetros en el transcurso de la colisión.

Antes de la simulación, se establecen las condiciones del impacto mediante el ajuste de las velocidades del vehículo y de todo lo que choque con él, en el instante anterior al impacto. En la propia colisión, la energía cinética se transforma en energía de deformación según las leyes de la física newtoniana. El cálculo de la conversión de uno en otro tipo de energía exige representar por relaciones sencillas el movimiento que acontece entre los numerosos elementos finitos y en el interior de los mismos. En la realidad, los programas suman las fuerzas aplicadas a todos los elementos. De ahí resulta un sistema de ecuaciones que se resuelve utilizando diversos métodos matemáticos y numéricos. El esfuerzo que sufren los elementos se determina aplicando principios clásicos de la técnica de materiales. La simulación se hace depender del tiempo, lo que significa que el sistema de ecuaciones se resuelve repetitivamente, actualizando cada vez la posición y los niveles de fatiga de todos los elementos. En cada nueva iteración se toman, por estado inicial, los resultados de la iteración anterior. La conversión prosigue, una iteración tras otra, hasta que ya no queda energía cinética por transformar; en otras palabras, hasta que todas las piezas móviles han llegado al reposo.

Durante la simulación, los programadores pueden determinar las velocidades y las deformaciones en los vértices de los polígonos de elementos finitos. Estos valores sirven para determinar el esfuerzo a que está sometido cada elemento finito. Para los componentes del modelo que representan los pasajeros (los "maniquíes informáticos"), se miden aceleraciones, movimientos y fuerzas, en vez de niveles de fatiga.

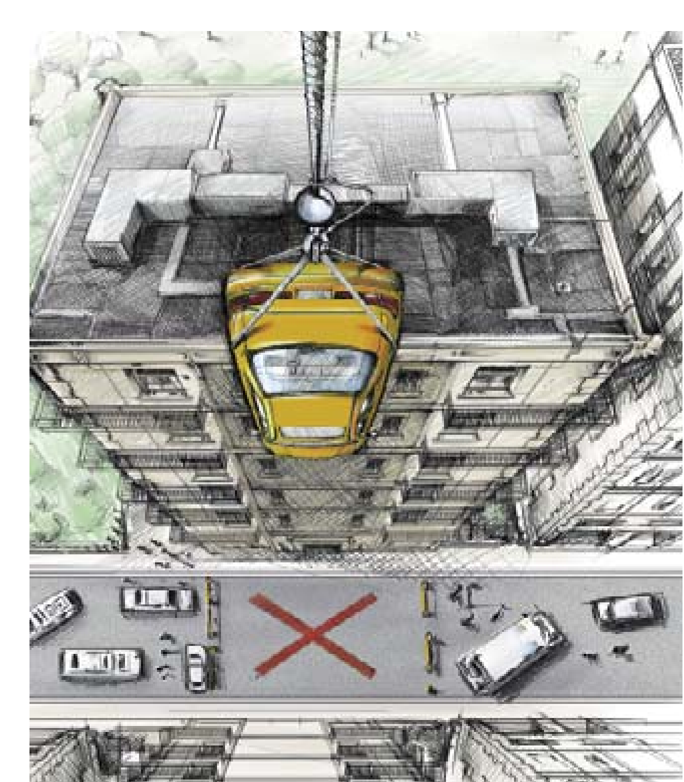
La industria de automoción baraja tres importantes programas de simulación: PAMCRASH, LS-DYNA3D y RADIOSS. Los tres se basan en programas desarrollados en los años sesenta con fines militares en los EE.UU. Operan según los principios de elementos finitos antes descritos. Muestran pequeñas diferencias en cuanto a los materiales que pueden simular fácilmente, la manera de tratar las superficies simuladas que entran en "contacto" en el choque y el soporte informático que proporcionan durante las fases de construcción del modelo (preprocesado) y de análisis de la colisión (posprocesado).

Tales programas fueron fruto de alianzas entre firmas de automoción y suministradores de programas informáticos. PAMCRASH, por ejemplo, nació de una alianza europea entre Volkswagen, Ford, Opel y Engineering Systems International (ESI). También utilizan mucho el PAMCRASH las fábricas de automóviles japonesas. Entre los fabricantes estadounidenses predomina el programa LS-DYNA3D, que tomó como base un programa escrito en el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore para modelizar las explosiones nucleares. El RADIOSS fue desarrollado en Mecallog, compañía francesa creada por antiguos empleados de ESI.

El potencial de la simulación quedó reflejado en un proyecto reciente de BMW, en el que un equipo formado por un ingeniero de proyecto, otro de simulación y un tercer ingeniero de pruebas se propusieron mejorar la seguridad de todos los vehículos de BMW ante impactos laterales. Este grupo comenzó en 1995 a explorar las posibilidades de la simulación (utilizaban el programa PAMCRASH), y decidió limitar las pruebas con prototipo a dos colisiones al final de todo el proceso para comprobar sus conceptos de diseño definitivos.

Como punto de arranque del proyecto se tomó un vehículo de la Serie 5 fabricado en 1995. Al terminar cada simulación, el grupo se reunía, analizaba los resultados y diseñaba otro experimento. Como era de esperar, disfrutaban de la rapidez de las respuestas que les permitía ensayar nuevas ideas y decidir en pocos días su aceptación o su rechazo. La sorpresa fue que, al crecer el número de ensayos, el total obtenido superaba la suma de las iteraciones: el grupo comprendía cada vez mejor la mecánica subyacente.

Un fruto notable de esta mejora ha sido, por ejemplo, el montante B, uno



5. LA ENERGIA DE UN IMPACTO frontal con una barrera rígida a 64 kilómetros por hora equivale a dejar caer el automóvil verticalmente desde 16 metros, más o menos la altura de una casa de seis pisos.







6. LA ZONA BAJA DEL MONTANTE B (*en verde*) de un sedán necesita ser más endeble, no más fuerte, para proteger mejor a los pasajeros en un accidente.

de los seis elementos estructurales que unen el techo del vehículo con el chasis situado bajo las ventanillas. (Todo coche tiene tres montantes a cada lado; de delante atrás se llaman A, B y C.) Analizando los datos sobre colisiones laterales de prototipos registrados desde los primeros proyectos de desarrollo, los técnicos del grupo habían descubierto que en todos los choques se doblaba una pequeña sección del montante B, contigua a la base del montante. Esta deformación les preocupó, puesto que, al curvarse, un montante pierde eficacia en su función de barrera, con el aumento consiguiente de la probabilidad de lesiones en los pasajeros.

Los técnicos dieron por sentado que añadir metal reforzaría la base del montante y otorgaría al coche mayor resistencia ante la penetración lateral. Ninguno de ellos creyó necesario probar este aserto. No obstante, un miembro del grupo insistió en verificarlo, sosteniendo que ello no sería difícil ni costoso mediante el ordenador. Con gran sorpresa de todos, la ejecución del programa reveló que, en realidad, el refuerzo de la zona deformada *disminuía* notablemente la capacidad de resistir el choque.

Al principio, ninguno de los componentes del grupo podía explicarse el fenómeno. Pero tras nuevas iteraciones y cuidadosos análisis descubrieron la causa. En efecto, al reforzar la parte inferior del montante B, éste tiende a plegarse en una zona más alta, por encima de la que se ha reforzado. Y en tal caso, el habitáculo de los pasajeros será franqueable a media altura, que corresponde al torso y la cabeza de los ocupantes del coche. Por tanto, la solución al problema de la deformación del montante B resultó ser contraria a la intuición: en vez de reforzar la zona inferior del montante, había que hacerla más endeble.

Comprendido lo anterior, el grupo emprendió una nueva evaluación de todas las zonas reforzadas de la carrocería de los vehículos BMW que se encontraban en producción o en desarrollo. El proyecto mejoró el comportamiento ante las colisiones de todos aquellos automóviles.

En 1996 acabaron los trabajos del grupo, tras haber provocado 91 accidentes virtuales y dos colisiones con prototipos en un año. Los vehículos experimentales objeto de rediseño mejoraron su capacidad de resistir choques en un 30 % con respecto al diseño inicial. Este resultado se midió por diversas vías: calculando y comparando las aceleraciones que sufren partes vitales del cuerpo (pelvis o tórax, simulados o del maniquí) en colisiones virtuales y reales. Debe destacarse que las dos colisiones de prototipos provocadas al término del proyecto confirmaron los resultados de las simulaciones, así como el ahorro conseguido: dentro del importe total, unos 50 millones de pesetas, costó más la construcción, preparación y prueba de los dos prototipos que las 91 pruebas de impactos virtuales.

Otros proyectos de BMW se dedicaron a colisiones frontales, con tan buenos resultados que, en 1997, el Instituto de Seguros para el Tráfico en Autopista de EE.UU. concedió la máxima calificación en materia de resistencia a choques a la Serie 5 de BMW, en cuyo desarrollo ha desempeñado un papel importante la simulación.

De aquí a cinco o diez años habrá modelos para simular colisiones con millones de elementos finitos. Hoy se tarda una semana en realizar una nueva iteración en una serie de pruebas, pero entonces ese ciclo se habrá reducido a la mitad de un día. Estos y otros progresos traerán beneficiosas consecuencias. Una de ellas, el disponer de modelos informáticos mucho más detallados, que mimeticen la fisiología humana y proporcionen datos que nunca podría aportar ningún maniquí sometido al choque. Es probable que por fin puedan simularse accidentes por derrapamientos. Y la enorme potencia de proceso prevista permitirá crear modelos de situaciones más reales, como la colisión múltiple, incluso desde diversos ángulos de incidencia.

Además, los ingenieros de automoción podrán simular en ordenador el comportamiento de sistemas de seguridad inteligentes, tales como las almohadillas neumáticas que detectan la posición, el peso y la altura del pasajero y utilizan esa información para ajustar la fuerza y velocidad con que se despliegan. Sólo mediante una simulación rápida y económica podrán los fabricantes realizar la gran cantidad de ensayos que requiere la optimización de estos valiosos dispositivos.

Los expertos en seguridad realmente acaban de descubrir el caudal que encierra la potencia de equipos y programas informáticos. En los diez años próximos, habrá progresos importantes que continuarán extendiendo el uso de los modelos informáticos en los procesos de desarrollo. Y a medida que las técnicas de simulación mejoren la capacidad de resistir choques, el éxito se irá midiendo por el número de vidas salvadas.

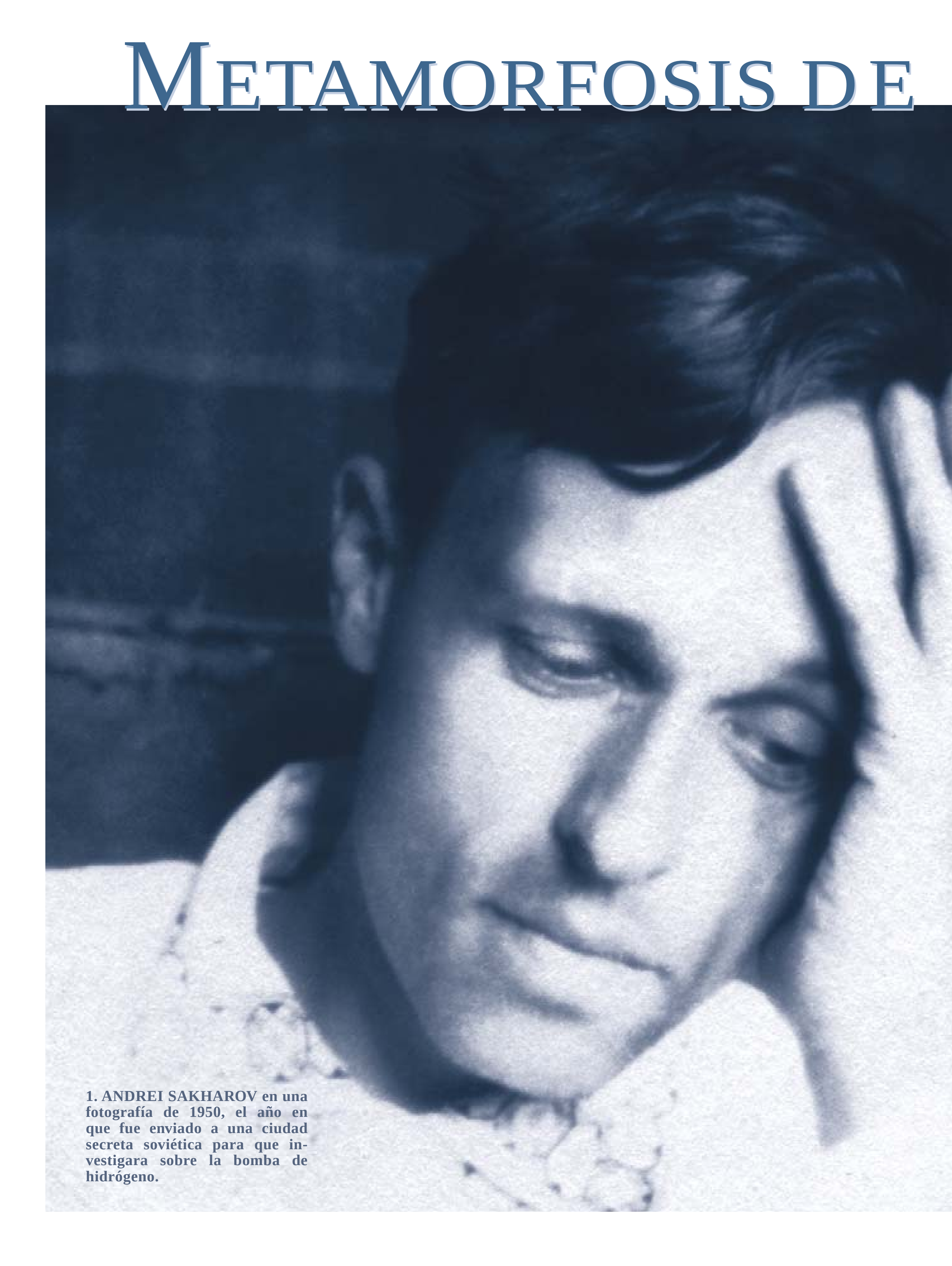
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SIMULATION, LEARNING AND R&D PERFORMANCE: EVIDENCE FROM AUTOMOTIVE DEVELOPMENT. Stefan Thomke en *Research Policy*, vol. 27, n.º 1, págs. 55-74; mayo de 1998.

MODES OF EXPERIMENTATION: AN INNOVATION PROCESS —AND COMPETITIVE— VARIABLE. Stefan Thomke, Eric Von Hippel y Roland Franke en *Research Policy*, vol. 27, n.º 3, págs. 315-332; julio de 1998.

Los sitios www.nhtsa.dot.gov de la NHTSA, y www.hwysafety.org del Instituto de Seguros para el Tráfico en Autopista incluyen bases de datos accesibles con información sobre la seguridad del tráfico y la capacidad de resistir choques de los vehículos.

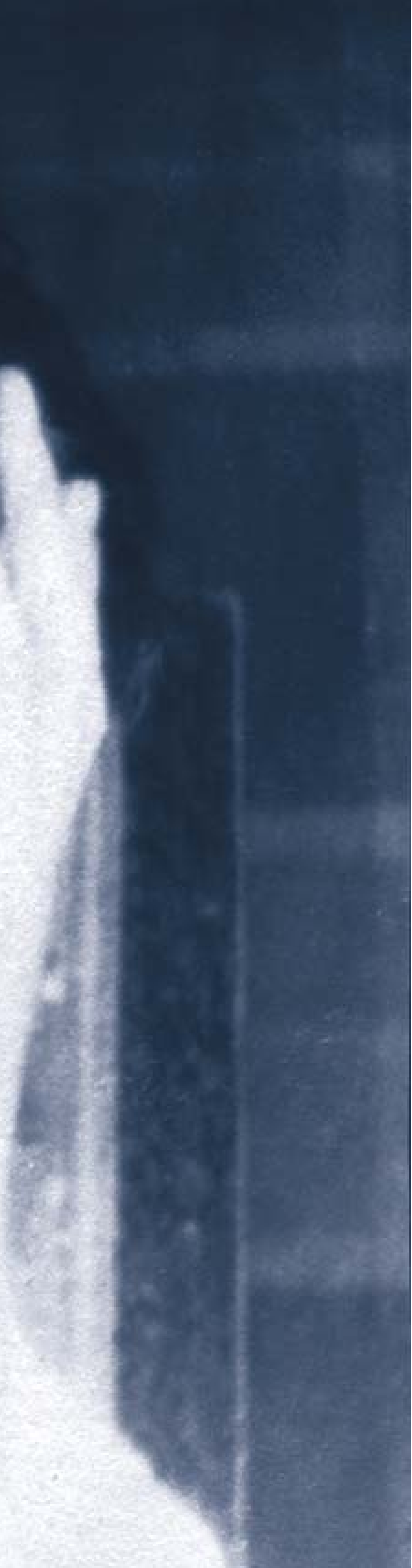
METAMORFOSIS DE



1. **ANDREI SAKHAROV** en una fotografía de 1950, el año en que fue enviado a una ciudad secreta soviética para que investigara sobre la bomba de hidrógeno.



ANDREI SAKHAROV



El inventor de la bomba de hidrógeno soviética se convirtió en defensor de la paz y los derechos humanos. ¿Qué le indujo a semejante cambio?

Gennady Gorelik

"La nube se tornó gris y se elevó en violento torbellino entre destellos anaranjados... La onda expansiva alcanzó mis oídos y me sacudió con fuerza; luego se oyó un rumor sordo y ominoso, que se desvaneció en unos treinta segundos... La nube, que velaba medio cielo, era de un siniestro azul oscuro."

Era el 12 de agosto de 1953 y Andrei Sakharov acababa de crear la bomba de hidrógeno soviética. Se puso un mono de trabajo y, acompañado de autoridades, se dirigió al lugar de la explosión. Su automóvil se detuvo junto a un águila con las alas quemadas, en un vano intento de levantar vuelo. Sakharov escribiría en sus memorias: "Me han dicho que en cada prueba las aves caen abatidas por miles. Se echan a volar al oír la explosión, pero luego se desploman, chamuscadas y ciegas."

Las víctimas inocentes de las pruebas nucleares llegaron a preocuparle, a obsesionarle incluso. Mientras diseñaba bombas cada vez más eficaces, no dejaba de pensar en las vidas humanas que se cobraría cada explosión. Sus infructuosos intentos por evitar pruebas superfluas le hicieron darse cuenta de que no tenía control alguno sobre las armas que había creado.

Ha corrido mucha tinta que pretende explicar la transformación del físico atómico en militante defensor de los derechos humanos. A su muerte, en 1989, los archivos estatales rusos desclasificaron documentos de su vida y su obra, hoy guardados en el Archivo Sakharov de Moscú. Junto con los escritos del propio Sakharov esa documentación revela la vinculación directa de la metamorfosis con la participación en proyectos armamentísticos. Durante muchos años, Sakharov creyó que las armas nucleares y termonucleares eran indispensables para mantener el equilibrio militar y evitar la agresión de los Estados Unidos. Su transformación no se debió a la adopción de una nueva moral, sino a la confluencia de su vieja moral de siempre con una dilatada experiencia en armas nucleares y la política de armamentos.

Sakharov nació en 1921 en el seno de una familia de la *intelligentsia* moscovita. Su padre, honrado profesor de física, dejó escritas varias obras de divulgación científica. En 1938, terminada la educación secundaria, Sakharov se matriculó en la Universidad de Moscú. Su débil constitución física le ahorró la movilización al estallar la guerra. Pero en 1942, terminada la carrera con un óptimo expediente, prefirió arrimar el hombro en la logística bélica a continuar estudiando. Se puso a trabajar como ingeniero en la fábrica de munición de Ulyanovsk, donde diseñó un dispositivo magnético para controlar la calidad de las balas.

Conoció en la fábrica a Klavdia Vikhireva, con quien se casó a los 22 años. Durante ese período planteó y resolvió algunos problemas de física sencillos, que su padre hizo llegar a Igor Tamm, jefe de fila en el Instituto de Física P. N. Lebedev en Moscú. A principios de 1945, Sakharov recibió una invitación oficial para continuar sus estudios en Moscú, bajo la dirección de Tamm.

Cierta mañana de agosto, al leer en el periódico la caída de una bomba atómica sobre Hiroshima, sintió que "su destino y el de muchas otras personas, tal vez la humanidad entera, había cambiado de la noche a la mañana".

LA CIUDADELA ERA UN COMPLEJO MILITAR LEVANTADO POR CONDENADOS JUNTO AL VIEJO MONASTERIO DE SAROV, A UNOS 500 KILÓMETROS DE MOSCÚ.



El antiguo monasterio de Sarov

Sakharov era un teórico fino y un hábil experimentador. Una de sus primeras teorías, aplicable a la detección de submarinos mediante un sonar, trataba de la propagación del sonido en un fluido con burbujas. También estudió la catalización de la fusión nuclear mediante muones, partículas ligeras parecidas al electrón. (Los átomos que contienen muones en lugar de electrones son mucho menores, por lo que no se requiere tanta compresión para fusionarlos.)

Su entusiasmo por la física teórica le llevó a declinar, por dos veces, la propuesta oficial para que se incorporara al programa nuclear. Una explosión atómica supone la fisión de un núcleo pesado, como el uranio 235, en dos partes aproximadamente iguales, con la consiguiente emisión de energía. Pero en 1948 Tamm anunció a Sakharov y otros colaboradores que les habían asignado la investigación de la bomba de hidrógeno. Este tipo de bomba se basa en la fusión de dos núcleos ligeros, como los de deuterio o tritio (isótopos del hidrógeno), y libera más energía que una bomba de fisión.

Yakov Zel'dovich, un físico brillante que dirigía la investigación teórica del programa de armas nucleares, mostró a Tamm un diseño provisional de la bomba de hidrógeno. La fusión exige poner en contacto dos núcleos de carga positiva que se repelen mutuamente, lo que sólo se consigue gracias a la enorme energía generada antes por una reacción de fisión. Se trataba de recurrir a la fisión para cebar la fusión —una reacción termonuclear— en uno de los extremos de un tubo de deuterio, y hacer que la fusión se propagara a lo largo del tubo. Este modelo de "superbomba", concebido por los estadounidenses, era conocido en la URSS desde 1945, probablemente gracias al físico y espía Klaus Fuchs.

Pese a su escasa experiencia, Sakharov propuso un diseño distinto, la *sloika* o "bollo laminado": una configuración esférica con una bomba atómica en el centro, rodeada de capas alternas de deuterio y elementos pesados, como el uranio natural. Los electrones liberados por la detonación atómica ejercían una presión enorme sobre la capa de deuterio, provocando su fusión. Los físicos soviéticos bautizaron el proceso como "sakharización", literalmente "edulcoración" (*sakhar* significa "azúcar" en ruso), aunque sin olvidar la alusión a su inventor. La fusión emitía a su vez neutrones, que provocaban la fisión de la capa de uranio.

Gracias a esta idea, perfeccionada por Vitaly Ginzburg con la substitución del deuterio por deuteruro de litio, los soviéticos alcanzaron a los americanos. Estos no cayeron en la cuenta, hasta 1950, de que su superbomba era un fiasco. Traspiés que corrigieron muy pronto Stanislaw Ulam y Edward Teller con su nuevo diseño viable. Había nacido la carrera de armamentos.

Aunque Sakharov estaba fascinado por la física de la fusión, el celo que puso en la construcción de la bomba tenía raíces patrióticas. Suscribía las ideas de "equilibrio estratégico" o "disuasión nuclear", como vías para evitar un conflicto nuclear. Sus sentimientos no admiten duda: "La enorme fuerza destructiva, la escala de nuestro proyecto y el precio pagado por un país pobre, hambriento y devastado por la guerra.. todo ello confería un gran dramatismo a la situación y nos daba fuerzas para creer que nuestro sacrificio —que aceptábamos como algo inevitable— no sería en vano. Nos guiaba una verdadera mentalidad de guerra."

Pero rechazó afiliarse al Partido Comunista, consciente de los crímenes que había cometido. No tuvo opción ya cuando, en marzo de 1950, él y Tamm fueron asignados a la ciudad secreta donde vivían los constructores de la bomba. La ciudadela era un complejo militar levantado por condenados junto al viejo monasterio de Sarov, a

GENNADY GORELIK acaba de terminar una biografía de Andrei Sakharov. Doctorado en 1979 por el Instituto de Historia de la Ciencia y de la Técnica de la Academia de Ciencias Rusa, se halla adscrito a la Universidad de Boston.



Arzamas-16

SIN NOMBRE EN EL MAPA, EL RECINTO ESTABA ENTERAMENTE CERCADO CON ALAMBRE DE ESPINO. SUS HABITANTES SE REFERIAN A LA CIUDAD CON NOMBRES EN CLAVE, ARZAMAS-16 UNO DE ELLOS.

unos 500 kilómetros de Moscú. Sin nombre en el mapa, el recinto estaba enteramente cercado con alambre de espino. Sus habitantes se referían a la ciudad con nombres en clave, Arzamas-16 uno de ellos.

Zel'dovich se encontraba ya en Arzamas-16. Aunque los físicos estaban consagrados a perfeccionar el diseño de la bomba, Sakharov halló tiempo para idear un sistema de confinamiento de un plasma (un gas a alta temperatura en que los electrones se han separado del átomo, dejando los núcleos al desnudo). El plasma destruiría cualquier pared material, pero un campo magnético permitiría confinarlo y hasta inducir su fusión. Este principio, la base del reactor tokamak, sigue siendo el más indicado para producir energía por fusión sostenida. ("Tokamak" proviene del término ruso que designa una cámara toroidal con una bobina magnética.)

En noviembre de 1952, los Estados Unidos hacían estallar una bomba termonuclear. En agosto de 1953, los soviéticos estaban listos para someter a ensayo la *sloika*. Sin embargo, en el último minuto Viktor Gavrilov, meteorólogo, advirtió que la nube radiactiva se extendería más allá del lugar de la prueba, afectando las poblaciones vecinas. Nadie había pensado en ello. Con la ayuda de un manual americano sobre los efectos de las pruebas nucleares, los físicos dedujeron cómo se difundiría la nube y se dieron cuenta de que había que evacuar a miles de personas. Las recomendaciones fueron seguidas, pese a que, como un funcionario hizo saber a Sakharov, en esos desplazamientos mueren de 20 a 30 personas.

La prueba de la *sloika* fue un éxito: la energía liberada era 20 veces la de la bomba de Hiroshima. Al cabo de pocos meses Sakharov fue elegido miembro de la Academia de Ciencias Soviética, con 32 años el físico más joven hasta entonces. También se le concedió el Premio Stalin y el título de Héroe del Trabajo Socialista. La cúpula soviética había depositado grandes esperanzas en Sakharov. Joven brillante, no era judío (como Zel'dovich o Ginzburg) y estaba políticamente limpio (lo que no podía decirse de Tamm).

La potencia que podía alcanzar la *sloika*, sin embargo, tenía un límite. Sakharov y Zel'dovich se aprestaron a idear un nuevo diseño. Había que aprovechar la radiación (fotones) generada por una explosión atómica para comprimir un tubo y detonar la fusión en su interior. La potencia de este modelo, parecido al de Ulam y Teller, podía aumentar indefinidamente sin más que aumentar la longitud del tubo.

En Arzamas-16 los físicos gozaban de algunos privilegios. Discutían de política con libertad. Recibían publicaciones occidentales, como el *Bulletin of the Atomic Scientists*, que abordaba la dimensión social de la energía atómica y la influencia política de los científicos del otro lado del Telón de Acero. Leo Szilard, descubridor de la "reacción en cadena" que hace posible las bombas atómicas, criticaba abiertamente la carrera de armamento nuclear. Sakharov conocía también los escritos políticos de Albert Einstein, Niels Bohr y Albert Schweitzer, cuyas opiniones debieron de hacerle mella.

El gobernador de Arzamas informó, en 1955, de que, pese a su excelencia científica, la conducta política de Sakharov no era encomiable. Había rechazado, por ejemplo, su elección como diputado en el Consejo del Pueblo, el cuerpo legislativo de Arzamas. Las cosas tomarían un cariz peor.

En noviembre de 1955 la Unión Soviética probó la bomba de hidrógeno ilimitada. La onda expansiva provocó el hundimiento de una trinchera, matando a un soldado, y derribó un edificio causando la muerte a un bebé. Ambos sucesos le afectaron. Por la noche, en el banquete de celebración, cuando se le pidió que propusiera un brindis, Sakharov dijo: "Espero que todos nuestros artefactos exploten tan bien como el de hoy, pero sólo sobre lugares de prueba y no sobre ciudades." El mariscal Mitrofan Nedelin replicó con una broma obscena, para añadir que los científicos debían limitarse a construir las bombas y dejar que los militares decidieran dónde había

que lanzarlas. Acababan de poner a Sakharov en su sitio.

Conforme se sucedían los ensayos nucleares, iba creciendo en paralelo el remordimiento de Sakharov por las víctimas anónimas de cada prueba. Hasta se enfrascó en libros de genética para calcular cuántas personas, en todo el mundo, se verían afectadas por cáncer y otras mutaciones como consecuencia de las pruebas atómicas.

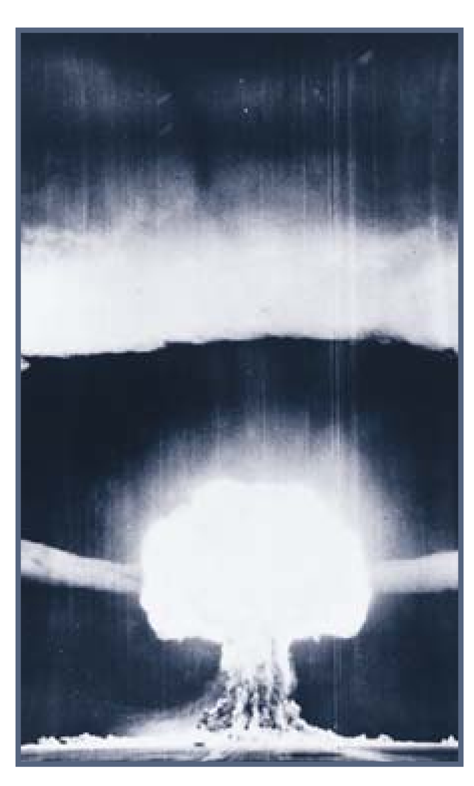
En 1957, la prensa estadounidense anunció el desarrollo de una bomba de fusión "limpia". Apenas usaba material fisionable y no provocaba nube radiactiva. Pero Sakharov calculó que una bomba limpia de un megatón (equivalente a un millón de toneladas de TNT) causaría 6600 muertes en todo el mundo durante 8000 años, debido a la proliferación de carbono 14 radiactivo (producido en el choque de los neutrones de la explosión con el nitrógeno de la atmósfera). Estos resultados, publicados en la revista soviética *Energía atómica*, llevaban a la conclusión según la cual la prueba en la atmósfera de cualquier bomba de hidrógeno, limpia o no, sería perjudicial para las personas.

Nikita S. Khrushev, primer ministro entonces, avalaba la publicación de este artículo. En marzo de 1958 había anunciado por sorpresa el cese unilateral de todas las pruebas nucleares. Pero Sakharov no estaba para maniobras políticas. Sus resultados indicaban que "el sufrimiento y la muerte que ya hay en el mundo se incrementarían en cientos de miles de víctimas, incluyendo a los ciudadanos de países neutrales y a las futuras generaciones". Le preocupaba, asimismo, el que "este crimen sea cometido con total impunidad, ya que es imposible demostrar que la muerte de un individuo es debida a la radiación".

Ese mismo año, Teller publicó *Our Nuclear Future*. En él exponía la opinión mayoritaria de expertos nucleares norteamericanos y soviéticos, en las antípodas de las preocupaciones de Sakharov. Para Teller, la dosis de radiación procedente de una prueba nuclear era una centésima parte de la procedente de la radiación cósmica o los rayos X. Además, la radiación emitida en una explosión de prueba reducía la esperanza de vida en dos días, mientras que un paquete de cigarrillos al día o un trabajo sedentario la reducían 1000 veces más. Teller concluía: "Se dice que no es ético poner en peligro vidas humanas. Pero, ¿no es más realista y acorde con los ideales humanitarios el luchar por una vida mejor para todos?" Pero Sakharov, que no compartía semejante planteamiento, se sentía responsable directo de cuantas bajas se produjeran por ensayos nucleares.

Pruebas atómicas que seguían realizando Estados Unidos y Gran Bretaña. A los seis meses de su moratoria unilateral, Khrushev ordenó reanudarlas también. Preocupado por evitar muertes innecesarias, Sakharov convenció a Igor Kurchatov, director del programa atómico, de que visitara a Khrushev para explicarle que era posible simular las pruebas mediante ordenadores y experimentos controlados. Khrushev rechazó un consejo que recibió a disgusto. Sakharov volvió a intentarlo en 1961. Khrushev le contestó entonces malhumorado que dejara la política para los políticos.

En 1962, Sakharov supo de la inminente prueba de dos bombas de hidrógeno muy parecidas, e hizo todo lo posible por evitar la duplicación. Llamó a todas las puertas, suplicó a Khrushev y enfureció a colegas y superiores, en vano. Al estallar la segunda bomba se inclinó sobre su mesa de trabajo y se echó a llorar.



2. *SLOIKA*, una bomba de hidrógeno basada en un diseño de Sakharov. La fotografía muestra la nube en forma de hongo y la onda de choque de la prueba llevada a cabo en Semipalatinsk (Siberia) en agosto de 1953.

Mas, para su sorpresa, la cuestión apremiante no tardó en resolverse. En 1963 se aceptó su propuesta de prohibir las pruebas más nocivas (las atmosféricas). Ese mismo año se firmó en Moscú el Tratado Restringido de Prohibición de las Pruebas. Sakharov estaba orgulloso de su contribución. Suspendidas las pruebas atmosféricas, no había que preocuparse ya de sus secuelas dañinas.

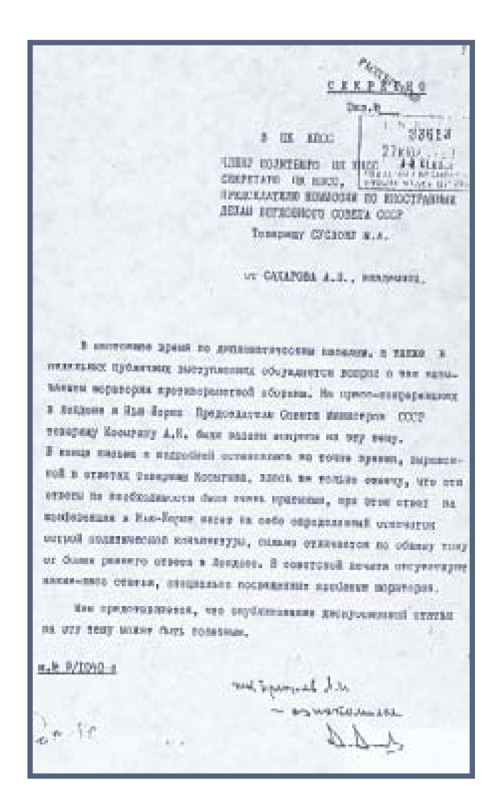
Pero la vertiente moral y política de la carrera armamentística era harina de otro costal. Aunque no se creía elemento imprescindible del programa, Sakharov se daba cuenta de que sólo perteneciendo a él podría seguir influyendo en la estrategia nuclear.

Nunca abandonó por completo a su primer amor, la física teórica, con sus cuestiones abiertas. Por ejemplo, la del exceso de materia sobre antimateria en el universo. En la explicación de las condiciones que llevan a ese desequilibrio reside la principal contribución especulativa de Sakharov.

En 1966 firmó un manifiesto contra la rehabilitación de Stalin. En diciembre del mismo año, y eso resultaba más comprometido, aceptó una invitación anónima para participar en una manifestación silenciosa en favor de los derechos humanos. Tras interceder por los disidentes ante el gobierno, vio drásticamente recortado su salario y perdió una de sus plazas administrativas. Estos hechos propiciaron una relación, que sería decisiva, con la oposición moscovita.

La ideología de Sakharov se radicalizaba por momentos y pugnaba por expresarse. En julio de 1967 envió una carta secreta al gobierno en la que argumentaba que la moratoria sobre misiles antibalísticos propuesta por los Estados Unidos favorecía a la Unión Soviética, pues una tal carrera de armamentos haría muy probable la guerra nuclear. Este memorándum de nueve páginas, con dos apéndices técnicos, se conserva en el Archivo Sakharov. En la carta se pedía también permiso para publicar en un periódico soviético un manuscrito adjunto de 10 páginas, con el fin de "ayudar a los científicos americanos a controlar a sus halcones". El artículo muestra que Sakharov se consideraba aún un experto comprometido con "los intereses esenciales de la política soviética".

La denegación del permiso le confirmó, una vez más, que el poder no sabía a qué peligro se exponía la humanidad.



СЕКРЕТНО

В ЦК КПСС

Товарищу СУСЛОВУ М.А.

от САХАРОВА А.Д., академика.

3. CARTA DE SAKHAROV a su gobierno (sólo se muestra la primera página) solicitando autorización para alertar en la prensa sobre el peligro de los sistemas antimisiles balísticos. La denegación del permiso llevó a Sakharov a escribir un ensayo radical que consiguió llegar a Occidente.

A principios de 1968 se enfrascó en la redacción de unas “Reflexiones sobre el progreso, la coexistencia pacífica y la libertad intelectual”. No hizo nada por ocultar el manuscrito de ese largo ensayo, copiado a hurtadillas por su secretaria y entregado al KGB (la copia, en papel carbón, se halla en los archivos presidenciales en Moscú). El artículo describía el grave peligro de guerra termonuclear y abordaba la contaminación ambiental, la superpoblación y la guerra fría. Sólo la libertad intelectual, y en general los derechos humanos, constituía, aducíase, la única base sólida de la seguridad internacional. Reclamaba la convergencia de socialismo y capitalismo en un sistema que reuniera las ventajas de ambos.

A finales de abril Sakharov hizo llegar su ensayo a la *samizdat*, o prensa clandestina. En junio lo envió a Leónidas I. Brezhnev (que ya lo había ojeado, gracias al KGB). En julio, la BBC hizo público el contenido del ensayo, que apareció en el *New York Times*. Sakharov escuchó con gran satisfacción la emisión de la BBC. La suerte estaba echada.

Se le ordenó que no abandonara Moscú y que no volviera a Arzamas-16, donde había pasado 18 años de su vida. Si no fue inmediatamente expulsado del proyecto nuclear es porque no resulta nada sencillo decidir el destino de un Héroe del Trabajo Socialista que conoce, además, los secretos mejor guardados de la nación. Su mujer murió de cáncer al poco tiempo, dejándole con tres hijos, el menor de los cuales tenía sólo 11 años. Abrumado por el dolor, Sakharov donó todos sus ahorros a un hospital para el cáncer y a la Cruz Roja soviética.

Empezaba para él una nueva vida. Conoció a Elena Bonner, de quien se enamoró. Recibió, en 1975, el premio Nobel de la Paz; sufrió siete años confinado en Gorki y, lo que resulta más increíble, pasó sus últimos siete meses como diputado electo del parlamento soviético.

“Si me siento libre —escribía de sí mismo— es porque me he guiado exclusivamente por mis propios juicios morales y no me siento comprometido con nada.” En los años setenta, Vladimir Ritus, compañero suyo, le preguntó por qué había tomado decisiones que le habían puesto en grave peligro. “¿Quién si no?”, respondió. No se creía ningún elegido, pero su trabajo en la bomba de hidrógeno le había puesto en la situación única de tener que tomar decisiones. Y se sintió obligado a tomarlas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANDREI DMITRIEVICH SAKHAROV. S. Drell y L. Okun en *Physics Today*, vol. 43 (agosto 1990), págs. 26-36.

ANDREI SAKHAROV: MEMOIRS. Traducido del ruso por Richard Lourie. Alfred A. Knopf, 1990.

SAKHAROV REMEMBERED: A TRIBUTE BY FRIENDS AND COLLEAGUES. Dirigido por Sidney D. Drell y Sergei P. Kapitza. American Institute of Physics, 1991.

NEW LIGHT ON EARLY SOVIET BOMB SECRETS. Número especial de *Physics Today*, vol. 49, núm. 11; noviembre 1996.

ANDREI SAKHAROV: SOVIET PHYSICS, NUCLEAR WEAPONS, AND HUMAN RIGHTS. Exposición en Internet del American Institute of Physics, disponible en la dirección www.aip.org/history/sakharov.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Un termómetro casero de alta precisión

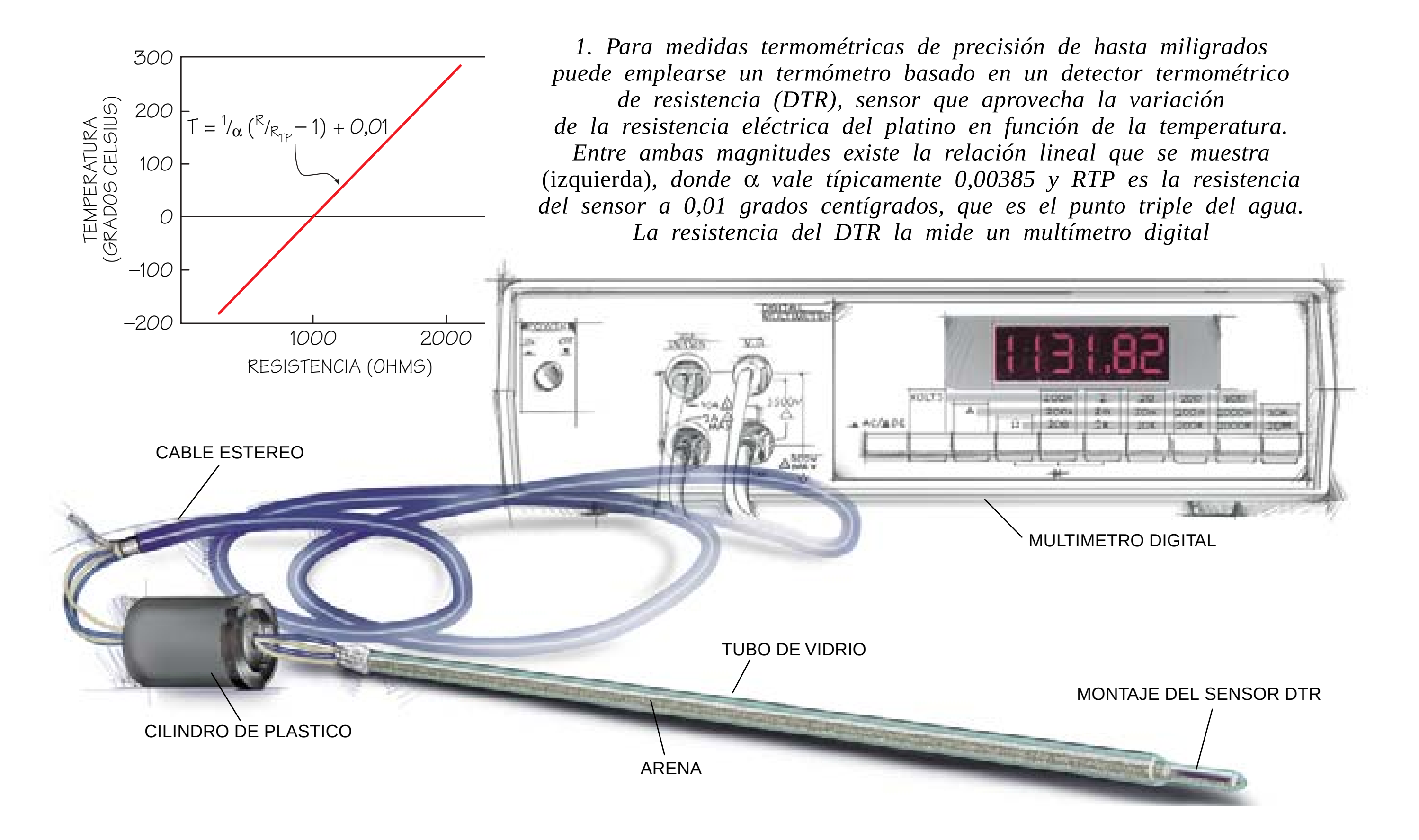
Describí el mes pasado una cuba de punto triple, instrumento que reproduce la singular temperatura a la que coexisten en equilibrio las tres fases, sólida, líquida y gaseosa, del agua. Una cuba de punto triple puede emplearse para calibrar termómetros de la técnica más avanzada, pero son carísimas. George Schmermund, desarrollador de nuestra cuba de punto triple, ha ideado también un termómetro capaz de medir temperaturas con una precisión de unas pocas milésimas de grado C. Y muy barato.

Para su termómetro Schmermund se sirve de un detector termométrico de resistencia (DTR), dispositivo que se basa en la variación de la resistencia del platino con la temperatura. Esta relación se conoce con exactitud. Por cada grado C de cambio de temperatura, la resistencia de uno de esos sensores varía 0,00385 ohms por ohm. Si la resistencia de nuestro DTR es de 100 ohms, cada variación de un grado C en su temperatura alterará la resistencia en 0,385 ohms. Conocida, pues, la resistencia de la sonda a una determinada temperatura, tal como el punto triple del agua, podrá convertirse en la temperatura correspondiente cualquier resistencia medida.

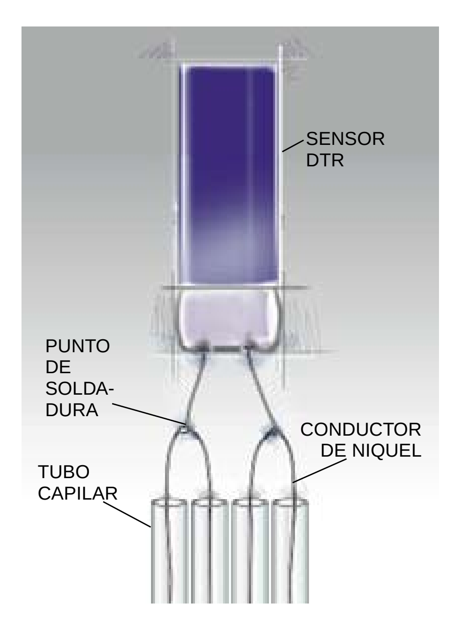
En el pasado, los DTR se hacían siempre con alambre conductor. Puesto que debía ser suficientemente grueso para soportar el proceso de fabricación y dado que, para un mismo material, la resistencia era tanto menor cuanto mayor era el diámetro del alambre, la resistencia de funcionamiento estaba limitada a unos 100 ohms. Pero contamos ya con una nueva generación de DTR depositando una capa ultrafina de platino sobre un substrato cerámico. La resistencia de algunos de esos dispositivos supera los 2000 ohms. En el catálogo de Omega Engineering, de Stamford (Connecticutt, www.omega.com, 800-826.63.42), se ofrece una gran variedad de esas maravillas. Para este proyecto necesitamos un modelo como el F3141, una pequeña unidad de 100 ohms, no encapsulada.

Esos nuevos DTR pueden dotar de una sensibilidad exquisita a nuestro laboratorio. Con un multímetro digital manual capaz de medir una resistencia de 1000 ohms a una precisión de 0,02 ohms, podremos distinguir temperaturas separadas por menos de 0,005 grados C. Tal capacidad gana por veinte a los termómetros de dilatación de líquido y aventaja por un factor de 10 al mejor de los termopares.

Y puede conseguirse más. En la práctica, la sensibilidad de un termómetro DTR está limitada por la precisión con la que pueda deter-

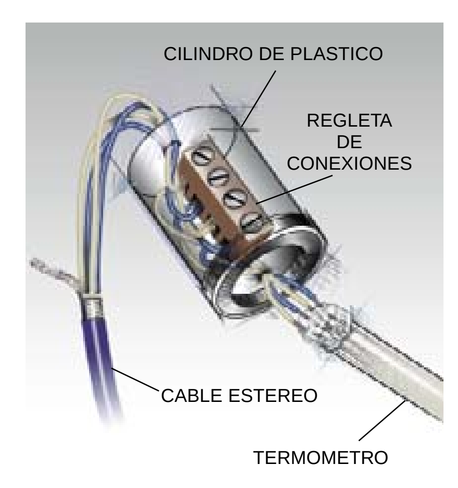


1. Para medidas termométricas de precisión de hasta miligrados puede emplearse un termómetro basado en un detector termométrico de resistencia (DTR), sensor que aprovecha la variación de la resistencia eléctrica del platino en función de la temperatura. Entre ambas magnitudes existe la relación lineal que se muestra (izquierda)*, donde α vale típicamente 0,00385 y RTP es la resistencia del sensor a 0,01 grados centígrados, que es el punto triple del agua. La resistencia del DTR la mide un multímetro digital*



2. El montaje de un sensor DTR consta de un sensor DTR conectado a dos conductores de níquel doblados de tal modo que pasen por el interior de cuatro tubos capilares

minarse su resistencia, que se mide observando la caída de tensión asociada a una intensidad de corriente conocida. Con un multímetro digital, los hilos conductores forman parte del circuito; su resistencia afecta a los resultados. Para esquivar ese error, medimos la caída de tensión directamente entre los extremos de la resistencia con un juego de hilos independiente. Esos ohmímetros de cuatro cables poseen entradas diferentes para fuente de corriente y voltímetro.



3. El cilindro de plástico protege una regleta de conexiones que une el termómetro a un cable que lleva a un multímetro digital

El multímetro HP 34401A de Hewlett-Packard emplea la técnica de los cuatro cables para medir 1000 ohms con una precisión de 0,001 ohms. Y los instrumentos de lo alto de la gama, de coste millonario, facilitan a los profesionales un poder separador de hasta 10 millonésimas de grado C. Configurado a cuatro cables, un termómetro DTR recibe el nombre de termómetro de resistencia de platino estándar (TRPE).

Para construir el termómetro de Schmermund, necesitamos un tubo de pyrex de 30 cm de largo y 8 mm de diámetro. Debe éste formar en un extremo un receptáculo de cinco centímetros de largo para alojar el sensor DTR.

Seguidamente, se fijan los conductores al sensor. Si los cables se sueldan con estaño o se emplean cables con aislante de plástico, los puntos de fusión de esos materiales impondrán un límite a las temperaturas. No suele ser un problema mayor. Mas, para extender al máximo posible la gama de temperaturas, Schmermund autosuelda por un punto el DTR a alambres de níquel desnudo, que luego aísla con manguitos de pyrex de poco espesor. Esos manguitos se los facilita un soplador de vidrio en longitudes de 46 centímetros, pero unos tubos capilares dan el mismo resultado cuando se ensartan en el alambre a la manera de cuentas en un collar.

Para hacer un termómetro a emplear con un ohmímetro de cuatro cables, Schmermund empaqueta en un haz cuatro de sus tubos y los encinta por un extremo. Dobla por la mitad dos trozos de alambre de níquel de un metro de longitud y pasa cada una de esas mitades por el interior de uno de los tubos, entrando por el extremo no encintado. Por último, suelda por un punto el DTR a los codos de los dos cables. (Nota: Si no se pretenden hacer mediciones a cuatro cables, basta con empalmar cada alambre a uno de los conductores del DTR.)

Para afianzar los costados del dispositivo y prevenir la formación de corrientes convectivas, se empaqueta el instrumento con diminutas cuentas de vidrio de sólo unas 25 micras de diámetro. Este material es caro y debe comprarse en una tienda de artículos científicos. Por suerte, también nos servirá arena de sílice fina.

Dado que la humedad atrapada dentro del termómetro falsea las lecturas, antes del montaje hay que eliminar el agua del relleno y del vidrio. Hornéese todo, incluso el conjunto del sensor montado, a 120 ºC durante unas dos horas.

Las fases siguientes deben realizarse con todo caliente. Hay que protegerse con guantes, gafas y vestimenta pertinente. Sujetaremos el tubo largo a un tornillo de banco. Tras introducir el montaje del DTR por el tubo, vertiremos con un pequeño embudo una cantidad suficiente de la arena desecada hasta que cubra por completo al sensor. Se iza un poco el conjunto para comprobar que el DTR está suspendido a unos dos milímetros del fondo de la cavidad, sin tocar la pared de vidrio. Retirada la cinta, se rellena poco a poco el tubo con arena caliente hasta menos de medio centímetro del borde superior, deteniéndose a menudo para golpear el vidrio con un lápiz y así afianzar el material.

Séllese herméticamente el termómetro rematando la arena con cola procedente de una pistola de encolar. Si se emplearan alambres sin aislante, caliéntense con un secador de cabellos durante algunos segundos antes de que se seque el adhesivo; los alambres han de asentarse por sí mismos dentro de la cola.

Para minimizar las interferencias radioeléctricas, conéctese la sonda al ohmímetro a través de un cable estéreo, compuesto éste por dos parejas trenzadas de cable apantallado en una vaina metálica que debe ponerse a tierra. Con una regleta de cuatro conexiones se conecta cada pareja trenzada a los extremos del sensor. Los alambres se sueldan con estaño y la regleta se protege con el cilindro de un carrete de película de 35 mm.

Este instrumento casero, funcional hasta unos 400 ºC, puede abrir unos fascinantes caminos a la investigación. En el laboratorio, puede ayudarnos a examinar la naturaleza de transiciones de fase y a medir la intensidad de enlaces químicos.

La Society for Amateur Scientists ofrece en un kit el termómetro Schmermund de cuatro cables (no incluye ohmímetro), completo con cables de alambre de níquel soldados al punto, tubos de pyrex prefabricados y cuentas de vidrio aislantes. Su precio es de 250 dólares. Para hacer un pedido, remita un cheque a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llame al 619-239.88.07. Para más información, consulte la página SAS Web en web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Destellos sincrónicos de las luciérnagas

Uno de los más llamativos espectáculos de la naturaleza tiene lugar en el sudeste asiático, tras la puesta de sol, cuando enjambres de luciérnagas emiten destellos en sincronía. Así lo veía por los años treinta Hugh M. Smith:

> Imagine unos ciento cincuenta metros de manglar en la ribera, una línea ininterrumpida de árboles con luciérnagas en todas sus hojas lanzando destellos sincrónicos, estando los insectos de los árboles extremos en perfecta armonía con los situados en el centro. Si realmente puede imaginárselo, sólo entonces quizá se haga una idea de tan fantástico fenómeno.

¿Por qué se sincronizan los destellos? El biólogo apelará a la evolución. Los destellos, emitidos por los machos, atraen a las hembras. Si están sincronizados, las atraerán desde distancias mayores, sobre todo en zonas de vegetación densa. ¿Qué dirá un matemático?

Las luciérnagas, para emitir luz, disponen de una sustancia química fotoemisora. Aunque cuentan con reservas suficientes, la liberan en pequeñas descargas, obedeciendo a un ciclo repetitivo. Es, en efecto, como si el gusano de luz, en cuanto ha emitido su destello, empezase a contar a ritmo constante desde 0, y sólo volviera a lanzar otro destello cuando la cuenta llega a 100. Su estado de "alerta" —el número que ha alcanzado en la cuenta— determina la "fase" del ciclo en que se encuentra.

Desde el punto de vista matemático, tal ciclo es un oscilador, una unidad cuya dinámica le obliga a repetir sin cesar una misma conducta. Los osciladores generan ritmos periódicos, de sumo interés en biología. Nuestro corazón y nuestros pulmones obedecen a ritmos regulares de este tipo, cuyo período viene determinado por las necesidades de nuestro organismo.

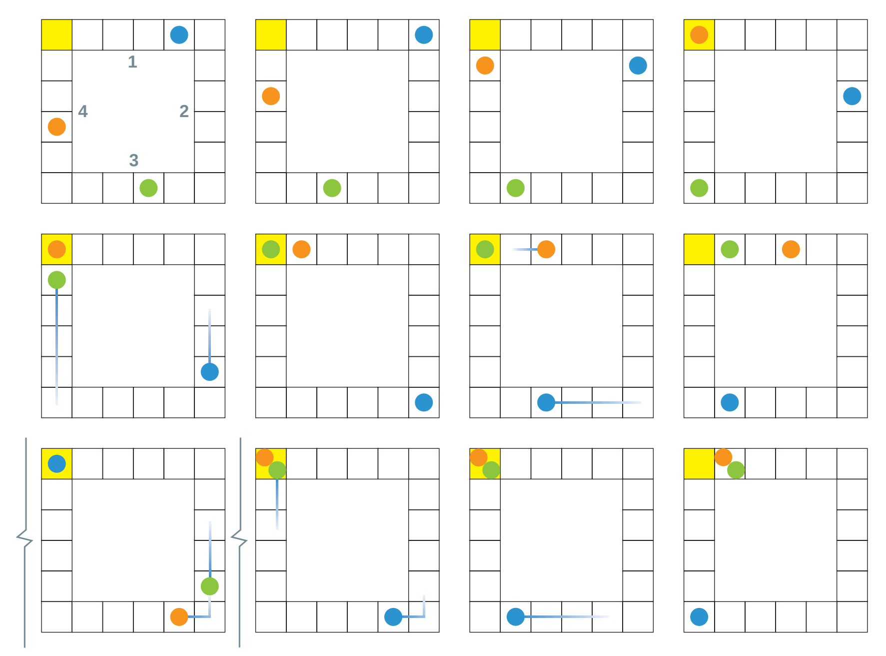
¿Por qué oscilan los sistemas? Porque si no se quiere, o no se puede, permanecer en reposo, la oscilación es lo más sencillo. Tenemos en la vibración de la cuerda de un violín un ejemplo físico. La cuerda no puede permanecer inmóvil, porque ha sido apartada de su posición de equilibrio natural. Pero tampoco es libre de hacer lo que le plazca, porque sus extremos han sido fijados. En consecuencia, en la región comprendida entre los puntos de fijación, la cuerda vibra con una oscilación periódica.

En el caso de las luciérnagas, las oscilaciones están creadas por un mecanismo de "integración y disparo". En tales osciladores de relajación, así se llaman esos sistemas, cierta magnitud va incrementándose gradualmente (la fase aumenta) hasta que alcanza un valor umbral. Superado el valor umbral, se desencadena una acción brusca —el disparo, o en el caso de las luciérnagas, el destello— tras la cual la magnitud vuelve a tomar el valor inicial y el proceso de acumulación comienza otra vez.

¿A qué se debe el sincronismo? Se ha comprobado que, cuando ciertas luciérnagas observan un destello, se excitan; su propia fase experimenta un súbito acelerón, que la hace aproximarse al valor umbral.

Se dice que tales osciladores están "acoplados", lo que significa que el estado de cada uno afecta al de los demás. Tenemos un ejemplo clásico en la observación, de Christian Huygens, de que los relojes de péndulo colocados en un mismo estante se influyen unos sobre otros, a través de las vibraciones del estante. Es frecuente que esta interacción les induzca a sincronizarse, siendo tarea de la persona inquisitiva averiguar por qué. (Advertencia: los osciladores acoplados no siempre entran en sincronía. Fijémonos en las patas de un animal durante la deambulación. Cada pata es un oscilador y el cuerpo del animal los acopla, pero las patas no se mueven todas a la vez.)

Charles S. Peskin dio el primer paso hacia la comprensión de tales procesos. En un estudio que realizó en 1975 sobre la sincronía de las fibras



FLASH es un juego que remeda la conducta de las luciérnagas. En la secuencia de estados iniciales, que van de izquierda a derecha y de arriba abajo, tres luciérnagas (puntos de color) *circulan por el contorno del tablero en sentido horario, acercándose a la casilla "destello"* (amarillo). *Cuando una luciérnaga la alcanza, lanza un destello, haciendo que todas las demás salten y se encuentren más próximas a destellar. En esta partida se han omitido varios estados intermedios*

musculares del corazón introducía un modelo detallado de un oscilador de relajación. El trabajo contenía una ecuación específica que describía cómo va aumentando la fase, ecuación que puede también aplicarse a las luciérnagas: estudios fisiológicos indican que se trata de una representación razonable, aunque no exacta, del ciclo de destello. En el modelo de Peskin los osciladores están "acoplados por impulsos": el único momento en que un oscilador afecta a otros es cuando se dispara. Envía entonces una señal a sus vecinos y así refuerza las respectivas fases de éstos. Si el empujón hace que otro oscilador rebase su umbral, también éste se dispara, y así sucesivamente.

Resulta que las sustancias fotoquímicas de ciertas luciérnagas se ven afectadas de esta forma por señales luminosas procedentes de otras luciérnagas. Cuando una ve el destello de otra, se excita, con lo que se aproxima a su valor umbral. Peskin demostró que, si dos osciladores de relajación idénticos están acoplados por impulsos y obedecen a esta ecuación, acabarán sincronizándose. (Si sus fases iniciales son ajustadas a valores muy especiales, sus destellos no llegarán a sincronizarse, sino que se alternarán periódicamente. Dicho estado, sin embargo, es inestable; bastará una mínima perturbación para destruirlo.)

Peskin conjeturó, asimismo, que otro tanto valdría para cualquier red de osciladores de relajación acoplados. Renato E. Mirollo y Steven H. Strogatz demostraron en 1990 que Peskin andaba en lo cierto, si se admitía una ecuación más general que la suya. Mirollo y Strogatz demostraron que en cuanto cumpla ciertas condiciones técnicas, un sistema de cualquier número de osciladores de relajación idénticos, totalmente acoplados entre sí mediante impulsos, acabará casi siempre por entrar en régimen sincrónico. (Lo mismo que antes, existe un conjunto raro de condiciones iniciales en las cuales el comportamiento es periódicamente alternante, pero dichos estados también son, de nuevo, inestables.)

Su demostración se basa en el fenómeno de la absorción, que acontece cuando dos osciladores con distinta fase se acoplan rígidamente uno al otro y permanecen en fase uno con el otro a partir de ese momento. Dada la plena simetría del acoplamiento (es decir, cada individuo afecta exactamente de la misma manera a todos los demás), una vez que un grupo de osciladores ha entrado en acoplamiento rígido, el grupo permanece en dicho estado. Se puede demostrar matemáticamente que una secuencia de estas absorciones ha de terminar provocando el acoplamiento rígido y conjunto de todos los osciladores.

Se puede explorar el sistema de las luciérnagas mediante un modelo más simple: un juego unipersonal llamado Flash, que se juega desplazando fichas por el contorno de un cuadrado, por ejemplo, de un tablero de ajedrez de 8 por 8, un tablero de Monopoly de 10 por 10 o, si se quiere, de 6 por 6 dibujado por uno mismo. En Flash se utilizan sólo los cuadros del contorno del tablero, uno de cuyos vértices (*amarillo*) es designado como casilla de "destello", o casilla "umbral". Se asignan a los cuatro vértices los números 1, 2, 3 y 4, en orden, contando desde el umbral en el sentido horario. Se colocan al azar unas cuantas fichas, que representan luciérnagas. La posición de una luciérnaga indica su fase: cuanto más próxima (*en sentido horario*) se encuentre del cuadrado de destello, tanto más cerca está de su umbral. Las luciérnagas alcanzan el umbral, destellan y reponen a cero su carga fotoquímica atendiendo a las reglas siguientes:

PASO 1. Mueva cada luciérnaga un cuadro en el sentido horario. Aunque sea necesario ir colocando las fichas una por una, se ha de imaginar que son movidas simultáneamente. (Este paso representa un aumento incremental de la fase.)

PASO 2. Si alguna luciérnaga ha ido a parar a la casilla de destello, desplace cada una de las restantes en el sentido horario un número de cuadros igual al número del lado del tablero en que se encuentre. Por ejemplo, una luciérnaga situada en el lado 3 se desplazaría tres cuadros en sentido horario. Pero no permita que ninguna pase sobre el cuadro de destello: si llega hasta él, deténgala allí. (Este paso representa el acoplamiento por impulsos. La segunda luciérnaga observa a la que destella, lo que hace que se aproximen al umbral. Las luciérnagas que tienen una fase mayor se desplazan más casillas, como hacen los insectos reales.)

PASO 3. Si alguna luciérnaga va a parar al cuadro de destello a consecuencia del paso 2, retórnese al comienzo de ese paso y vuelva a mover en consecuencia todas las demás fichas.

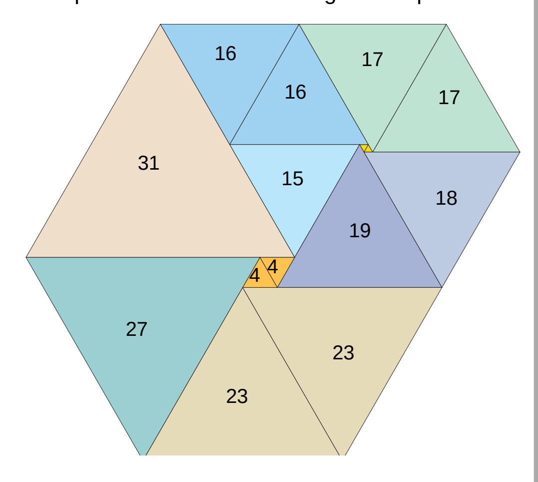
PASO 4. Regrese al paso 1.

Observemos que si dos o más luciérnagas se posan en una misma casilla, entran en sincronía; en lo sucesivo habrán de ser movidas como una sola unidad. Eso es lo que ocurre en la secuencia ofrecida como ejemplo. Si seguimos jugando, descubriremos que, al final, las tres acaban actuando al unísono.

Sospecho que para ciertos tamaños del tablero sería posible hallar posiciones iniciales conducentes a comportamientos periódicos, asíncronos, correspondientes a los estados inestables de la teoría de Mirollo-Strogatz.

Acuse de recibo

Tetsuro Kawahara ha descubierto una solución mejor del problema del embaldosado al que se aludió en los Acuses de recibo de septiembre de 1997 y octubre de 1998. El problema consistía en hallar la máxima región convexa que puede ser pavimentada con triángulos equiláteros cuyos lados sean enteros sin divisores comunes. En el caso de 15 triángulos, Kawahara descubrió una preciosa configuración en vórtex (*a la derecha*) cuya superficie mide 4782 unidades, un poco más que la de 4751 presentada. (Por unidad de superficie se toma el área de un triángulo equilátero de lado 1.) Kawahara añade que la superficie del pavimentado construido con 11 triángulos es 495, y no 496, como se decía. —*I.S.*



NEXOS

James Burke

Prestos los oídos

La predicción meteorológica de la radio me trajo la otra noche a la memoria una de esas historias de héroes anónimos. William Ferrel, un maestro de escuela de Pennsylvania, tímido y autodidacto, explicó en 1858 la manera en que la rotación de la Tierra afecta al desplazamiento de los fenómenos atmosféricos y ofreció la aproximación matemática necesaria. Lo de anónimo se refiere a que suele atribuirse la paternidad de ello al francés Coriolis. Y no es verdad.

Inspiró a Ferrel, igual que a todos los meteorólogos del siglo XIX (y casi a cualquiera que tuviera algo que ver con la ciencia) el trabajo de Alexander von Humboldt. Sería complicado resumir lo que Humboldt *no* hizo. Metió cuchara en economía, geología, minería, electricidad, climatología, geografía, oceanografía, cosmología, matemática, exploraciones (en todas partes), vulcanología, botánica, química, cartografía... Humboldt era admirado por los admirables. También fue uno de los primeros ecologistas genuinos. En 1804, tras un fatigoso viaje por Sudamérica, visitó a otro egregio personaje: Thomas Jefferson. Por aquel entonces Jefferson se encontraba muy atareado con las expediciones de Lewis y Clark, con la cartografía de las costas, con las mejoras de la agricultura y otras, así que cuando Humboldt y él se encontraron, echaron la casa por la ventana.

Los unía también una formación muy influida por la filosofía. Humboldt era kantiano. Jefferson había estudiado filosofía en el Colegio universitario "William and Mary", antes de dedicarse a otros menesteres. Es posible que al "William and Mary" no les agrade el comentario en su totalidad, pero he leído en algún sitio que buena parte del dinero invertido en su fundación lo donó Lionel Wafer, cirujano, escritor y bucanero que lucía tatuajes y un labio de plato, cortesía de los indios del Darién panameño. Durante cinco años de piratería, amasó un buen botín. Un santo. Cuando le echaron el guante y encerraron dos años en Jamesdown, se le confiscó lo robado para "la construcción de una universidad".

El botín de los piratas no siempre eran lingotes de oro, joyas y chatarra. A veces, los galeones españoles asaltados llevaban mercancías de valor real. Cochinillas, por ejemplo. Cazadas en cactus mexicanos en una fase precoz, secadas en un horno y reducidas a polvo, llegaron hacia 1620 a manos de un fabricante de pasta holandés, Cornelius Drebbel, que estaba a punto de decantarse por la disciplina militar. Drebbel nos legó microscopios, submarinos y linternas mágicas. Y el color escarlata. Esto último, gracias a un accidente que tuvo con estos insectos, algún tiempo después de haberse trasladado a Londres. Echó las cochinillas dentro de una jarra de hojalata donde había una mezcla de ácidos sulfúrico e hidroclorhídrico. Y lo que salió era de un intenso escarlata. Se lo comunicó a su yerno Abraham Kuffler, quien enseguida se dedicó a producir un nuevo tinte, el escarlata Kuffler. En 1645 Cromwell tiñó los uniformes de su nuevo ejército y a partir de entonces cualquier británico que desfilara y portara un arma pasó a llamarse "casaca roja".



En boca de un escocés, era un insulto, dado el comportamiento de los británicos tras el fracaso del levantamiento de las Tierras Altas en 1745 encabezado por Charlie. La vida en Escocia se hizo tan ingrata que sus gentes huían en masa a América. Años después, cuando las cosas se habían calmado, algunos fugitivos regresaron a hurtadillas. Fue el caso de Flora MacDonald, que había colaborado en la fuga de Charlie tras la derrota escocesa de Culloden. De vuelta a Escocia, en 1779, Flora enfermó y recurrió a los servicios de Alexander Monro *secundus*, aunque tercero de cuatro generaciones de eminentes galenos de la nueva facultad de medicina de la Universidad de Edimburgo. *Secundus* era el tercero porque su padre, otro Alexander, era conocido como *primus*, pues *su* padre se llamaba John. ¿Fácil, no? De cualquier forma, mientras esquivaba los ladrillos que entraban por su ventana lanzados por una plebe indignada (no le agradaba que los estudiantes entraran en los cementerios para trasladar los cuerpos de sus seres queridos a la mesa de disección), A. M. *primus* enseñaba a un marinero llamado James Lind, quien dio con otro improperio despectivo con que referirse a los británicos, esta vez, entre los norteamericanos.

En mayo de 1747, en el mercante *Salisbury*, Lind realizó el primer ensayo clínico riguroso de la historia de la nutrición. Durante catorce días, prescribió la misma dieta a seis parejas de enfermos de escorbuto; a cada par le administró un tratamiento distinto: sidra, esencia de vitriolo, vinagre, agua de mar, un ungüento medicinal y naranjas y limones. La clave estuvo en los cítricos. En 1753 Lind publicó

“Un tratado sobre el escorbuto” que llevaría, años después, a la marina británica a administrar raciones de zumo de lima a sus marineros. Se acabó para ellos el escorbuto, pero se les empezó a llamar “los de la lima”.

Lo que inspiró las investigaciones de Lind fueron las espantosas noticias sobre el terrible fracaso de una expedición naval. En 1740, el comodoro George Anson partió de Inglaterra con seis barcos y una tripulación de más de mil hombres, con la misión de llegar al Pacífico y hostigar a los españoles allá donde los encontrara. Y a fuer que cumplieron, atacando puertos y barcos españoles, sembrando la destrucción a diestro y siniestro. Cuando regresó, cuatro años más tarde, volvía con un botín tal que se necesitaron treinta carros para descargarlo y guardarlo en la Torre de Londres. La misión hizo a cada tripulante rico de por vida. Tocaron a una parte mucho mayor de la esperada, porque de los seis barcos y mil hombres que partieron, regresó una sola nave con ciento cuarenta y cinco hombres a bordo. El escorbuto mató al resto.

Irónicamente había sido otra emergencia médica la que había motivado el viaje de Anson. En 1731, el *Rebecca* se encontraba en el Caribe vendiendo mercancías de contrabando a un galeón español con más dinero que sentido común, cuando un grupo del nuevo cuerpo de guardacostas llegó desde La Habana y, según las palabras de la carta británica de protesta al gobierno de La Habana, lo dejaron en estado “de no poder superar el viaje de regreso”. Milagrosamente el *Rebecca* consiguió arribar a Inglaterra y siete años más tarde, así de lentas son las cosas de la historia, el capitán Robert Jenkins expuso su versión de los hechos ante un comité parlamentario. Lo hizo presentando una caja en la que había guardado su oreja desde que el guardacostas cubano Juan de León Fandino se la cortara durante la escaramuza. Por qué razón debería de conservar su oreja en una caja, es algo que se me escapa, pero de otra manera no hubiera llegado a ser un apéndice histórico. El escándalo parlamentario que siguió a la presentación de semejante prueba y el subsiguiente clamor popular condujeron a un conflicto entre Gran Bretaña y España, hoy conocido como la “Guerra de la Oreja de Jenkins”.

El estadista francés Mirabeau citaría más tarde el conflicto como un ejemplo clásico de lo que sucede cuando se deja una declaración de guerra en manos de politicastros. A la muerte de Mirabeau, Francia le estuvo tan agradecida por lo que había hecho (no queda espacio para los detalles) que se rebautizó la iglesia parisiense en la que fue enterrado como Panteón. Allí colgó León Foucault su péndulo gigante en 1851. El péndulo se desplazaba en un espacio inercial e inspiró al meteorólogo americano del que hablaba al principio a declarar “que si un cuerpo se mueve en una dirección cualquiera, existe una fuerza, procedente de la rotación terrestre, que siempre la desvía hacia la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el sur”.

Arboles

Enseñanzas biomecánicas

DESIGN IN NATURE. LEARNING FROM TREES, por Claus Mattheck. Rombach Verlag; Berlín-Heidelberg-New York, 1997.

Esta obra pretende dar a conocer qué leyes pueden gobernar el crecimiento de los árboles, huesos de esqueletos de animales y otros elementos con vida de la naturaleza desde el punto de vista de su viabilidad mecánica. Así, por ejemplo, estudia cómo se desarrolla la estructura de un árbol en un determinado momento de su vida. Si ha de adaptar su estructura a la fuerza de la gravedad; a los momentos que se originan en su tronco y ramas debidos a esta misma fuerza y a la incidencia del viento; el grado en que estas fuerzas influyen al lado del natural fototropismo; qué leyes rigen el desarrollo de las raíces en su función necesaria de sostener el árbol. Influencia del suelo, de su cohesión y su dureza.

Parte de la base del principio de esfuerzo uniforme: el crecimiento que se experimenta en cualquier punto del tronco, ramas o raíces de un árbol lleva siempre la dirección y sentido que hace que la tensión o presión se uniformicen en la zona y sean constantes.

Se verifica a través del crecimiento adaptativo de los árboles cuando se interponen a éste obstáculos; como pueden ser objetos inanimados, árboles de otras especies o de la misma. El comportamiento varía en cada caso, pero el principio sigue siendo válido. Ante circunstancias cambiantes como el viento, peso de la nieve, etcétera, el principio se mantiene, aunque el árbol "promedia" las distintas situaciones en su adaptación.

Con los huesos de los animales, por ejemplo, se observa el mismo principio, pero hay que añadir a la posibilidad de crecer, la de reducirse en aras a una disminución de peso, no necesaria en un árbol pero sí en el esqueleto de un animal, que ha de moverse. La parte de hueso que soporta peso se desarrolla más en cuanto detecta esfuerzos desigualmente repartidos. La que no soporta peso se descalcifica.

El libro describe cómo se realiza la simulación del crecimiento (o decrecimiento) adaptativo por ordenador, de acuerdo con este principio básico, sobre un programa de elementos finitos y muestra la coincidencia entre el modelo y lo observado en la naturaleza. El principio es, por tanto, aplicable a la industria en el diseño si se desean obtener elementos de parecidas características de resistencia y ahorro de material a las que se pueden presentar en la naturaleza. Por ejemplo, ¿cuál es la estructura óptima que debe presentar un tornillo con placa en una soldadura ósea a fin de garantizar su consistencia?

Mattheck, que es jefe del departamento de biomecánica de la Universidad de Kalsruhe, ha escrito un libro didáctico en su presentación y contenidos, meticulosamente redactado, que se lee fácilmente. Válido para el lector interesado meramente en los aspectos biológicos del crecimiento de los árboles y otros elementos de la naturaleza y válido también, y quizá sobre todo, para aquellos que se dedican a la investigación de la naturaleza en sus múltiples aspectos auxiliados por los procedimientos iterativos que permiten los ordenadores para la confrontación y verificación de resultados. Se puede decir también que ofrece un interés práctico a los diseñadores industriales.

JOSÉ Mª FERRÁN LARRAZ

Siglo XIX

Observar, experimentar, idear

L'INVENTION SCIENTIFIQUE DE LA MÉDITERRANÉE. Dirigido por Marie-Noëlle Bourguet, Bernard Lepetit, Daniel Nordaman y Maroula Sinarellis. Editions de l'Ecole de Hautes Etudes en Sciences Sociales; París, 1998. **GIOVAN PIETRO VIEUSSEUX. JOURNAL-INTINÉRAIRE DE MON VOYAGE EN EUROPE (1814-1817) CON IL CARTEGGIO RELATIVO AL VIAGGIO**. Edición preparada por Lucia Tonini. Leo S. Olschki; Florencia, 1998. **REGARDFULLY YOURS. SELECTED CORRESPONDENCE OF FERDINAND VON MUELLER**. Edición preparada por R. W. Home, A. M. Lucas, Sara Maroske, D. M. Sinkora y J. H. Voigt. Peter Lang; Berna, 1998.

MESMERIZED. POWERS OF MIND IN VICTORIAN BRITAIN, por Alison Winter. The University of Chicago Press; Chicago, 1998.

PHYSICS IN THE NINETEENTH CENTURY, por Robert D. Purrington. Rutgers University Press; New Brunswick, 1997. **THE NATURAL PHILOSOPHY OF JAMES CLERK MAXWELL**, por P. M. Harman. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **JAMES CLERK MAXWELL. A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM**. "Oxford Classic Texts in the Physical Sciences". Clarendon Press; Oxford, 1998. **HENDRIK ANTOON LORENTZ. ON THE THEORY OF THE REFLECTION AND REFRACTION OF LIGHT**. Edición preparada por Nancy J. Nersessian y H. Floris Cohen. Rodopi; Amsterdam, 1997.

A su vuelta de la expedición a Morea (Peloponeso), Bory de Saint-Vincent debe guardar cuarentena en Toulon. Paseando por los alrededores del lazareto descubre un helecho que sabía medraba en Grecia, Canarias y la España peninsular. Pese al frío intenso que excepcionalmente reina en Provenza, Saint-Vincent reconoce que se halla, el pteridófito lo prueba, en un clima cálido. Esa inicial observación se irá fundando en motivos geológicos, biológicos y climáticos que terminarán por definir una región que limita al norte con los olivares y al sur con las palmeras. Será el descubrimiento y *L´invention scientifique de la Mediterranée*.

En tres ocasiones envía Francia una expedición científica a distintos países de la cuenca. A Egipto durante el Directorio (1798-1801), a Morea bajo el reinado de Carlos X (1829-1831) y a Argelia con la monarquía de Julio (1839-1842). Los resultados oficiales aparecieron, respectivamente, en la *Description de l'Egipte*, *Expédition scientifique de Morée* y *Exploration scientifique de l'Algérie*.

Con la expedición a Egipto se abandona el albur por una preparación minuciosa. Observar, medir, levantar mapas y describir metódicamente el país, conforme va abriendo paso el ejército, ésa es la tarea. Para asegurar la unidad de las operaciones y evitar la dispersión anecdótica, los expedicionarios reciben instrucciones impresas que enumeran en diez columnas los objetos a registrar y que van desde la naturaleza del terreno, clima o régimen de aguas y vientos hasta la producción agrícola y artesanal, con las obligadas fauna y flora.

Egipto ofrece un banco de pruebas para la investigación científica. Monge resuelve la óptica de los espejismos que han sufrido los soldados en su marcha por el desierto. Las excursiones hacia los lagos de Natron le permiten a Berthollet renovar las leyes de la afinidad química. Los botánicos subrayan la semejanza de la flora egipcia con la de Barbaria, Siria, Arabia e incluso con el Midi. Geofroy, Savigny o Coquebert encontraron en los monumentos funerarios del antiguo Egipto unos especímenes de singular valor. Ibis, gatos, cabras, halcones y demás animales momificados fueron trasladados a Francia. A ellos apeló Cuvier para reforzar su oposición a las doctrinas transformistas, pues era manifiesta la identidad estructural entre los animales momificados y los vivos de tres o cuatro mil años después.

No todos miraban a levante con igual propósito. Antes de la segunda expedición francesa se produce un viaje paradigmático del cambio social y económico que se produce en Europa a principios del Ochocientos. El protagonista, Giovan Pietro Vieusseux (1814-1817), anotó sus impresiones que ahora salen a la luz en forma de *Journal-Itinéraire de mon Voyage en Europe pendant les années 1814, 1815, 1816 et 1817 pour les intérêts de Senn, Guebhard & Co. de Livourne*. Razones mercantiles aparte, veía en el comercio exterior la fuerza para soldar la débil unidad interna. "¿Por qué dejamos que ingleses y franceses se asienten en zonas que la naturaleza de las cosas puso a nuestra disposición para civilizarlas?"

La apertura de mercado con Noruega se convierte en una radiografía de la nación y de sus gentes. Se advierte la desazón del viajero cuando ha de salir de las ciudades ribereñas del sur, Cristianía, Göteborg, Fredrikstad, para adentrarse por el interior del país. Le duele la tala implacable de los bosques de "la Suiza del norte". Región apenas habitada, con unos caminos monótonos y temibles y un paisanaje provinciano vulgar, perezoso y cerril, sin empuje para mejorar su ruda suerte. Siempre dependiente del mar, no sabe empuñar el arado. Si el noruego, disperso y solitario, desconoce la división del trabajo, en las ciudades rusas lo que falta es una clase media (un *tiers état*). Así, de San Petersburgo a Odessa, pasando por Novogorod, Twer, Moscú, Kiew, la estepa.



Gian Pietro Vieusseux con su padre en este retrato de autor desconocido, de principios del siglo XIX

Al hilo de esos nodos van apareciendo la complejidad del comercio incipiente, la deficiencia de vías de comunicación, la incertidumbre del sistema monetario, el riesgo de las exportaciones y la endeblez de los seguros. Reelabora cartas, notas e impresiones. En la *Mémoire sur le commerce du poisson en Norwége* se concentra en las exportaciones de bacalao. Mar rico, valdría la pena hacer un registro de especies comerciales y localización exacta de los bancos. El comercio de cereales constituye el objeto de *Commerce des grains à Taganrock, Lettre particulière sur le commerce d'Odessa, Encore quelques observations sur Odessa, Série de demandes sur le comnmerce des grains à Kaffa*... Al puerto de Odessa llegan los granos de los países eslavos. Junto a los silos de trigo, cebada y centeno, pueden verse almacenes de judías, guisantes y maíz. Los hebreos, siempre intermediarios, aceptan por moneda fuerte de intercambio la *piastra*, es decir, el peso de plata antigua español, que valía entonces 4,78 rublos.

Entre ese viaje y la segunda expedición francesa, Augustin Pyramus de Candolle publica el artículo "Géographie botanique" en el *Dictionnaire des sciences naturelles*. Su relación con el terreno es indirecta. Ha herborizado a menudo y ha viajado mucho por Europa, pero lo esencial de su trabajo lo ha realizado sobre colecciones, herbarios, jardines botánicos. Partiendo de estos materiales y conociendo el origen geográfico de los especímenes, compara las floras. Observa que ciertos grupos de especies —a las que propone darles el nombre de "endémicas"— son peculiares de una región particular. Subraya la originalidad de las floras insulares y divide la superficie de la Tierra en una veintena de regiones botánicas. Insiste sobre la distinción entre "estación" y "habitación" de una planta; aquélla es el medio en que vive, ésta la región donde puede encontrársela. Esta perspectiva cala en los redactores de la *Expédition scientifique de Morée*. Sobre todo, en Bory de Saint-Vicent, que se ocupa de buena parte de las fanerógamas, autor también del programa que sirvió



Sesión de mesmerismo. El trance

de guía para la exploración argelina y alma de la *Exploration scientifique de l'Algérie*.

En adelante, las expediciones, aunque fueran individuales, se atendrían a unas pautas establecidas de antemano. Lo ratifica *Regardfully Yours.* Descubridor del ecosistema mediterráneo *avant la lettre* de Australia, Ferdinand von Mueller (1825-1896) se embarca recién terminada una premiosa formación en la Universidad de Kiel. Se propone extender el plan humboldtiano y poner en aplicación las ideas geobotánicas. Porta consigo el *Prodromus florae Novae Hollandiae* de Robert Brown, la *Lübeckische Flora* de Gottfried Häcker y el candolleano *Prodromus systematis naturalis regni vegetabilis*.

En 1853, se le nombra botánico del gobierno de Victoria y, más tarde, director del jardín de Melbourne. Herboriza a menudo. Inicia la publicación de *Fragmenta phytographiae Australiae*. Sigue el primer tomo de la *Flora australiensis* y, luego, las *Select extra-tropical plants*. Esas y otras fuentes persisten todavía como referencia obligada de la taxonomía y fitogeografía de Australia.

Por encima de todo, hemos de valorar su infinita correspondencia. Seleccionada en tres volúmenes, éste es el primero, en el que destacan las cartas cruzadas con William Hooker, director del Jardín Botánico de Kew, quien le abrió los cuantiosos recursos del centro y le puso en contacto con Joseph Hooker, Georges Bentham, Miles Berkeley. También con Charles Darwin.

El fautor de la teoría de la evolución a través de la selección natural se le dirige con una solicitud sumamente significativa. En 1857, Darwin se presenta apelando a la amistad común con Hooker, a quien "le ha oído ponderar a menudo sus descubrimientos en botánica, hasta el punto que creo que ya le conozco". La cuestión que le plantea, para la elaboración de su libro según ahora sabemos, es crucial. Se trata de que le aclare "si muchas plantas perennes de las Islas Británicas y del norte de Europa pueden resistir y producir semillas en el clima de Australia. Doy por supuesto que las plantas se siembran en un jardín adecuado, libre de la intrusión de plantas nativas. Admito que sean regadas durante la estación seca. Desearía averiguar si pueden resistir el calor y llevar a término la fructificación. Entiendo que así pueda ocurrir con las plantas del sur de Europa, pero de lo que se trata es si pudieran medrar un gran número de plantas muy septentrionales. Le agradecería muchísimo su respuesta. Sé que muchas plantas del sur de Europa resisten aunque tengan que luchar con la vegetación nativa." Adaptación y lucha por la existencia son los ejes del *Origen de las especies*, aparecido un par de años después.

Uno de los temas de estudio más opacos, más persistentes también, a lo largo del siglo XIX, fue el de la mente y sus facultades. Franz Anton Mesmer abrió la brecha con la doctrina del "magnetismo animal", entendiéndolo como una aplicación médica de la filosofía newtoniana. En esa atmósfera, la investigación de la conciencia se fue haciendo cada vez más empírica, trasladando las cuestiones filosóficas al campo de la fisiología. Se consideraron objeto de inquisición clínica prioritaria el examen de los territorios cerebrales y la disección de nervios.

Pero no se empezó por el laboratorio. La práctica se adelantó. Inglaterra cayó en una suerte de trance general, como lo define la autora de *Mesmerized. Powers of Mind in Victorian Britain*. En palacios y buhardillas, en

hospitales y universidades, individuos intachables caían en posturas extravagantes, hablaban lenguas extrañas y soportaban estoicamente agresiones dolorosísimas. En el trasfondo del debate, la división entre la ciencia y la impostura, entre lo real y lo imaginario en el ámbito de la experiencia personal. Ideas que hoy reputamos disparatadas, ni Faraday ni Dickens las despreciaron. Samuel Wilberforce, Augustus de Morgan, Richard Whatley, Harriet Martineau, Wilkie Collins y Alfred Russel Wallace participaron en sesiones mesméricas. Se establecieron hospitales seguidores de esa terapia en Londres, Edimburgo y Dublín. Se fundaron docenas de sociedades. Y para enturbiarlo todavía más, pocos objetarán que el mesmerismo orientó la investigación hacia la anestesiología y la psicología.

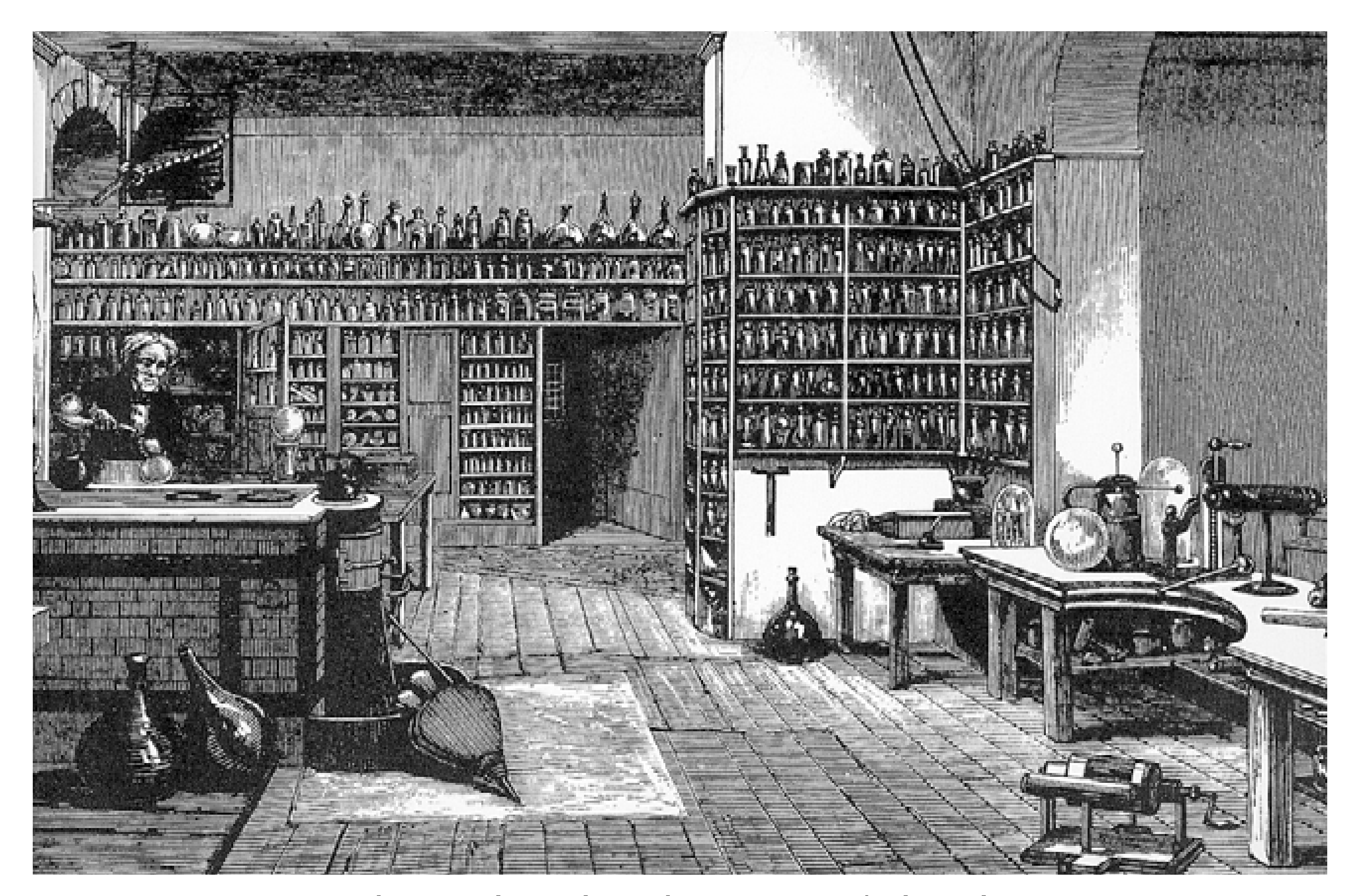
Mediados los cuarenta, los médicos ingleses se dividían entre partidarios y adversarios de ese método. Muchos cirujanos sustituyeron el opio y vino por las nuevas técnicas "magnéticas" de insensibilización.

Horace Wells, un dentista de Boston, se empeñó también en seguir los métodos mesmeristas para anestesiar a sus pacientes, mas por mucho que lo intentaba, cada sesión resultó un fracaso. Lo mismo le ocurrió con el óxido nitroso. Hasta que con su socio William Morton probó en 1846 la anestesia por inhalación de éter. La nueva, repetible y fundada en principios científicos, sin ningún truco escondido, se expandió por Boston e Inglaterra. Era un remedio médico genuino, mensurable, propio del siglo en que se vivía.

Este afán de rigor, que sólo podía ofrecer la física newtoniana, terminaría por convertirse en el sello distintivo de la centuria, enfoque con el que se ha escrito *Physics in the Nineteenth Century*. En la primera mitad se clavan los raíles por donde echan a andar la mecánica, electricidad, magnetismo, óptica, calor y termodinámica, elasticidad e hidrodinámica, consideradas todavía partes indivisas de una misma entidad; esta perspectiva adquirirá mayor solidez con el reconocimiento de que los problemas fundamentales de áreas distintas admitían una formulación matemática similar. La física de la segunda mitad del siglo redobla su paso con innovaciones técnicas y construcciones teóricas, en las que participa, y ése es un factor de manifiesta trascendencia, una pléyade de segundones.

Las sociedades científicas —viejas y nuevas— recogían y promovían las inquietudes emergentes. Junto a las seculares Regia Sociedad de Londres o Real Academia de Ciencias de París, se fundan la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia en 1831 o la Sociedad Física de Berlín, que opera desde 1843. Se renuevan las universidades inglesas. En Alemania, Wilhelm Weber instala en Götingen el primer laboratorio de física en 1833. A su imagen se abren los de Leipzig, Berlín, Königsberg y Heidelberg. Desde 1845 se editan con regularidad la revista alemana *Fortschritte der Physik* y, más o menos contemporáneamente, la italiana *Il Nuovo Cimento*.

Para esas fechas había caído ya la visión laplaciana de la materia dominante a principios de siglo, que concedía un papel principal a los fluidos imponderables. El calórico, que daba cuenta de la transferencia de un fluido material de un cuerpo caliente a otro frío, se retiró en beneficio de la teoría dinámica del calor. Otro fluido imponderable explicaba la electricidad, hasta que se la interpretó como una suerte de fenómeno vibratorio. En torno a la termodinámica y al electromagnetismo pivotará el quehacer de los físicos.



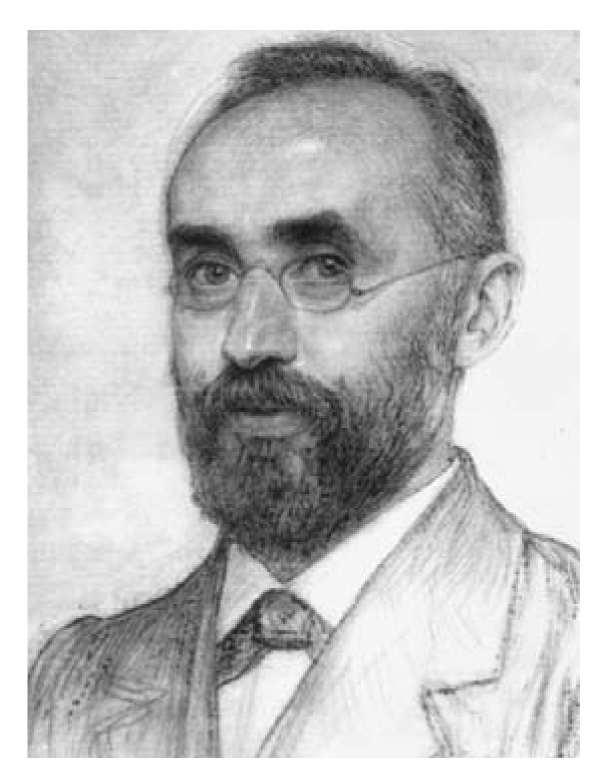
Laboratorio de Faraday en la Regia Institución de Londres

Benjamin Franklin y otros habían mostrado que el rayo o la botella de Leyden podía imantar o desimantar una aguja magnética, lo que sugería una conexión entre los dos fenómenos. Pero hasta que Alessandro Volta no inició el trabajo que condujo a la pila voltaica en 1800, era imposible experimentar con corrientes sostenidas. Todo lo disponible como fuente de energía eléctrica almacenada era la botella de Leyden, que permitía sólo corrientes transitorias, breves, cuando se descargaba.

La vinculación sugerida entre los fenómenos eléctricos y magnéticos la confirmó Hans Christian Oersted en 1819, al observar que una corriente eléctrica podía desviar una aguja magnética. Al año siguiente, Andrè-Marie Ampère realiza la serie de experimentos sobre los que funda las leyes de la electrodinámica; halló que el agua imantada forma un ángulo de 90 grados con respecto a un cable conductor y anunció la interacción entre dos corrientes paralelas. Por último, aportó la teoría matemática de la interacción entre corrientes basada en fuerzas centrales.

Para avanzar por el electromagnetismo, Michael Faraday tomó un camino más tortuoso que el seguido por Ampère. Sin preparación matemática suficiente, sólo una portentosa habilidad experimental puede explicar los progresos anotados en *Researches* y *Diary*. Presto a investigar el efecto hallado por Oersted, descubre él la rotación magnética, la rotación de un filamento portador de corriente en torno a un imán. Con la ayuda de potentes electroimanes advierte que ni las corrientes estáticas ni los campos magnéticos, por intensos que sean, inducen el flujo; sólo se produce ese fenómeno cuando se modifica un campo o, por decirlo con los términos de Faraday, cuando un conductor corta las líneas magnéticas de fuerza.

La realidad de las líneas de fuerza y la unidad de la electricidad y el magnetismo fueron asumidas por su sucesor, Maxwell, nacido en el mismo año que Faraday descubrió la inducción magnética (1831). Maxwell fraguó el armazón matemático que Faraday necesitaba. De mente vigorosa, fue puente entre Newton y Einstein, razona Peter Harman en *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. A su muerte en 1879, había revolucionado la teoría electromagnética y la teoría cinética de los gases. Nos legó la mecánica estadística, uno de los pilares de la teoría cuántica; la teoría de la relatividad brotó directamente, vía Lorentz, de su teoría del electromagnetismo.



Hendrik Antoon Lorentz

Maxwell vertebró los principios esbozados en física de la energía por Hermann Helmholtz y Thomson, en teoría de campos por Faraday y Thomson, en termodinámica por Thomson y Rudolf Clausius y, en teoría de gases, por Clausius. Sus logros principales —la unificación de la óptica y el electromagnetismo en teoría electromagnética de la luz, la aplicación de la mecánica de partículas a la comprensión de las propiedades de los gases y los fundamentos de la ciencia de la termodinámica— descansaban en la intuición de analogías y en la comprensión de la unidad subyacente bajo vertientes dispares de la física.

La teoría de Maxwell del "campo" electromagnético, expuesta en el *Treatise on Electricity and Magnetism*, que acaba de reimprimir Clarendon, da por cierto que las fuerzas eléctricas y magnéticas se ejercen en un medio. Si no inmediata, la influencia del *Treatise* configuró la obra de Georg Francis FitzGerald, Oliver Heaviside, Joseph John Thomson y otros "maxwellianos". Las "ecuaciones de Maxwell" recibieron el estatuto de las leyes de Newton sobre el movimiento.

En uno de sus primeros escritos, "On Faraday´s lines of force", esbozaba ya un modelo geométrico de líneas de fuerza en el espacio, una representación que descansaba en la teoría del potencial y la geometría de superficies ortogonales. Modificó luego el modelo del éter para incluir la electrostática. Y llegó a la teoría electromagnética de la luz. En el desarrollo de su construcción teórica, Maxwell conjuga cuatro ideas matemáticas fundamentales: cuaterniones (conceptos vectoriales), teoremas integrales (teorema de Stokes), conceptos topológicos y el método de Lagrange-Hamilton de dinámica analítica.

Su pensamiento adquiere plenitud en la parte final del *Treatise*, donde presenta las ecuaciones generales del campo electromagnético, la teoría electromagnética de la luz y la base dinámica de su teoría de campos. Para él las hipótesis hasta entonces esgrimidas remiten a fuerzas que actúan a distancia sin la mediación de un "campo", que no pueden explicar satisfactoriamente la transmisión de energía. "Debe haber un medio o substancia donde exista la energía", el éter.

La teoría de Maxwell sobre los gases nos retrotrae a sus años juveniles. En marzo de 1855 se convoca el premio Adams de la Universidad de Cambridge, consagrado en esa ocasión al movimiento de los anillos de Saturno. Había deducido Maxwell que el sistema constaba de anillos concéntricos de satélites, base de *On the Stability of the Motion of Saturn´s Rings*. Al considerar los anillos un sistema de partículas, advirtió que no podía determinar las trayectorias de éstas. Había que introducir argumentos probabilísticos.

Para explicar la lenta difusión de las moléculas de gas, Clausius había calculado la trayectoria libre media, o probabilidad de que una molécula recorra una distancia determinada sin colisionar. Maxwell generalizó el procedimiento de Clausius introduciendo una fórmula estadística para la distribución de velocidades entre moléculas de gas. Lo que empezó siendo un ejercicio de mecánica, acabó generando resultados en física molecular. Llegó a la conclusión, inesperada, de que la viscosidad de

los gases era independiente de su densidad.

De la teoría de los gases pasó a la interpretación de la segunda ley de la termodinámica, a la paradoja del "demonio de Maxwell". Paradoja que, en su propia formulación, afirma que la segunda ley de la termodinámica es un teorema estadístico, no una ley dinámica. Al sugerir que un cuerpo caliente podía extraer calor de un cuerpo más frío demostró que la segunda ley de poseía una regularidad estadística. Debido a la distribución estadística de las velocidades moleculares en un gas en equilibrio, habría fluctuaciones espontáneas de moléculas que portaran calor de un cuerpo frío a otro caliente. Pero ello exigiría la acción de un ser finito, así lo llamó él, que manipulara moléculas hasta producir un flujo observable de calor desde un cuerpo frío hasta otro más caliente, y violara la segunda ley de la termodinámica; por tanto, la ley es estadística y se aplica sólo a sistemas de moléculas.

La maxwelliana teoría electromagnética de la luz había sido el tema de grado escogido por quien, en pocos años, tomaría el testigo en la investigación de los fundamentos de la física. Nos referimos a Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) y a su *On the Theory of the Reflection and Refraction of Light. Academic dissertation for acquiring the degree of doctor in the mathematical and physical sciences at Leyden University*, defendida el 11 de diciembre de 1875.

Entre 1872 y 1877 fue profesor de instituto en Arnhem. Y en 1877 lo contrató la Universidad de Leiden, que le ofreció la primera cátedra de física teórica de Holanda. Remiso a toda relación externa, cambió drásticamente de parecer en 1897, cuando asistió a una conferencia en Düsseldorf y comprobó la importancia del flujo de ideas. Abrió el Congreso Internacional de Física de París en 1900. Por su dominio de varios idiomas y su finura en el trato se le encomendó la dirección de las conferencias Solvay. En 1902 compartió el premio Nobel de física con Pieter Zeeman. Lorentz había aportado una explicación teórica del "efecto Zeeman" (1896) —el desdoblamiento de las rayas del espectro cuando se aplica un campo magnético a la fuente del espectro— mediante la extensión de una hipótesis empleada en su teoría electromagnética, a saber, que los cuerpos materiales contienen partículas dotadas de carga ("iones") y de capacidad de oscilar.

El problema de la reflexión y la refracción de la luz no estaba resuelto en la teoría electromagnética de Maxwell. En su disertación establece la superioridad de la teoría del éter electromagnético sobre la teoría del sólido elástico para explicar tales fenómenos. Demostró, sin embargo, que ninguna de ambas teorías daba una justificación satisfactoria de la dispersión. Admite, empero, el éter electromagnético de acción a distancia, de Helmholtz, y no la exposición de acción continua, de Maxwell.

Con todo, se centra en la combinación de la teoría electromagnética de Maxwell con una teoría de la materia donde hallaran explicación todos los fenómenos ópticos y electromagnéticos; para ello, conjuga el campo electromagnético de Maxwell, a través del cual las acciones se transmiten continuamente, con las partículas newtonianas, que actúan mutuamente a distancia. A través de la "teoría de los electrones" de Lorentz la dualidad de campos y partículas penetra en la física moderna.

LUIS ALONSO

Técnica española

Hidráulica

LOS VEINTIÚN LIBROS DE LOS INGENIOS Y MÁQUINAS DE JUANELO, ATRIBUIDOS A PEDRO JUAN DE LASTANOSA. Nicolás García Tapia. Diputación General de Aragón. Dpto. Educación y Cultura. Zaragoza, 1997.

El libro que reseñamos trata de un manuscrito patrocinado por Felipe II, publicado entre 1564 y 1575, considerado como texto muy válido para la hidráulica española del siglo XVIII, que se encuentra en la Biblioteca Nacional de Madrid y que, en principio, se atribuyó a Juanelo Turriano, famoso mecánico de Carlos I y de Felipe II. De entrada resulta curioso que este manuscrito no está formado por veintiún libros ni está escrito por Juanelo: éste es el argumento de la primera parte del libro reseñado.

En la segunda parte, la más larga y documentada, el autor destaca las citas clásicas referentes a la arquitectura (Vitruvio, Julio Frontino, Leon Battista Alberti, Sebastian Serlio, Antonio Labaco, Pietro Cataneo, Jacobo Beroco Viñola y Hieronimo Magi) y a la ingeniería (Plinio el Viejo) que se encuentran en *Los veintiún libros...*

La ciencia que transmiten *Los veintiún libros...* citados empieza con el agua como el tema principal del manuscrito y se describe a modo de elemento natural, para seguir con el ciclo hidrológico, las propiedades físicas y químicas, la conservación, la depuración y las mareas. Otro de los cuatro elementos de la ciencia de aquel entonces, la tierra, es objeto de estudio empezando con los fósiles y los minerales y terminando con los árboles como frutos de la tierra. El aire y el fuego también se describen con profusión. Seguidamente se abordan otras disciplinas como por ejemplo la geometría, la física y la mecánica. En cuanto a la tecnología cabe destacar los materiales para la construcción más utilizados en aquella época (los betunes, las maderas y su transporte, las piedras, la cal, el yeso, los ladrillos y las tejas), las transmisiones por engranajes, el mecanismo biela-manivela, las levas, los trinquetes, las poleas, los husillos y las grúas.

Comentario aparte merece la arquitectura hidráulica. En *Los veintiún libros...* el agua acapara la atención y por este motivo se describen con todo tipo de detalles las técnicas de prospección acuosa y de transporte (tuberías, arcas, acueductos, sifones, cruces, almacenamientos, túneles, galerías, algibes, cisternas, acequias y canales), aplicaciones del agua para el ocio y el disfrute (jardines, fuentes, estanques y termas), máquinas hidráulicas (molinos de canal, de bomba, de cubo, de regolfo, de medio regolfo, de balsa y de barca), máquinas para elevar el agua (el tímpano, la noria, la cóclea y la tisibica), obras hidráulicas (las presas, los azudes, los puentes y los puertos) y aplicaciones tan curiosas como los relojes de agua.

La tercera y última parte constituye un excelente y erudito trabajo acerca de la identidad del autor de *Los veintiún libros...* El autor del libro reseñado destaca algunos elocuentes detalles como son los giros gramaticales, empleados corrientemente por los aragoneses, e identifica algunas representativas ilustraciones de *Los veintiún libros...* para, finalmente, identificar y localizar el autor del manuscrito como un noble relacionado con la Corte y procedente de la zona cercana a Monzón, provincia de Huesca. La tesis es que se trata de Pedro Juan de Lastanosa, que admitimos plenamente.

PERE MOLERA

Richard F. Zamboni

Reacondicionadoras de pistas de hielo

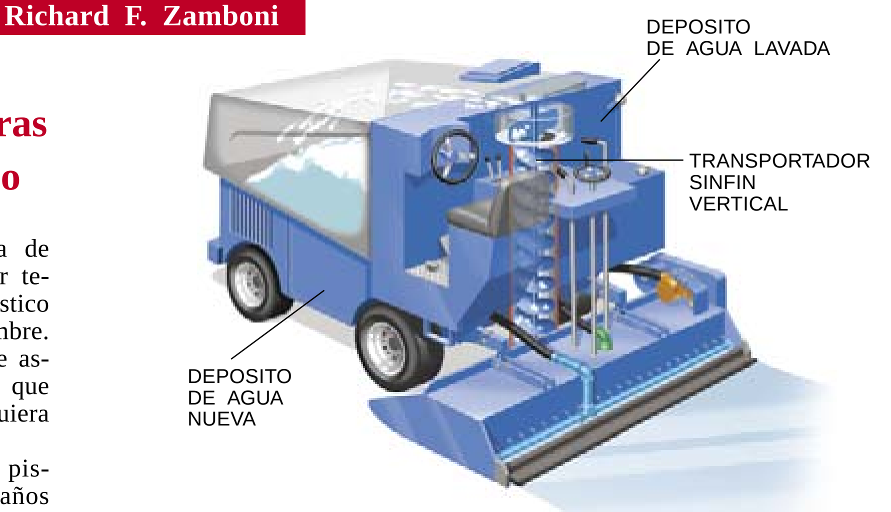
Quien haya asistido a una pista de patinaje sobre hielo o haya visto por televisión un espectáculo de patinaje artístico o hockey, se habrá encontrado con mi nombre. Quizás en la parte frontal de un vehículo de aspecto insólito que aparece por la pista y hace que la superficie astillada y picada del hielo adquiera la lisura del vidrio.

La primera máquina reacondicionadora de pistas de hielo la construyó mi padre en los años cuarenta. Con su hermano y su primo fueron propietarios y explotadores de la pista de patinaje Paramount Iceland en Paramount (California). Tan poco atractivo pero eficaz invento, resultado de siete años de desarrollo por ensayo y error, entró en servicio regular en la pista Paramount en 1949. Un año después, Sonja Henie (*arriba*, *izquierda*), legendaria patinadora y actriz, la vio en funcionamiento e inmediatamente encargó dos para su espectáculo ambulante. Aquellas dos máquinas, la tercera y la cuarta de las construidas, pudieron verse en pistas de Estados Unidos y Europa, anunciando la llegada del reacondicionamiento mecanizado del hielo.

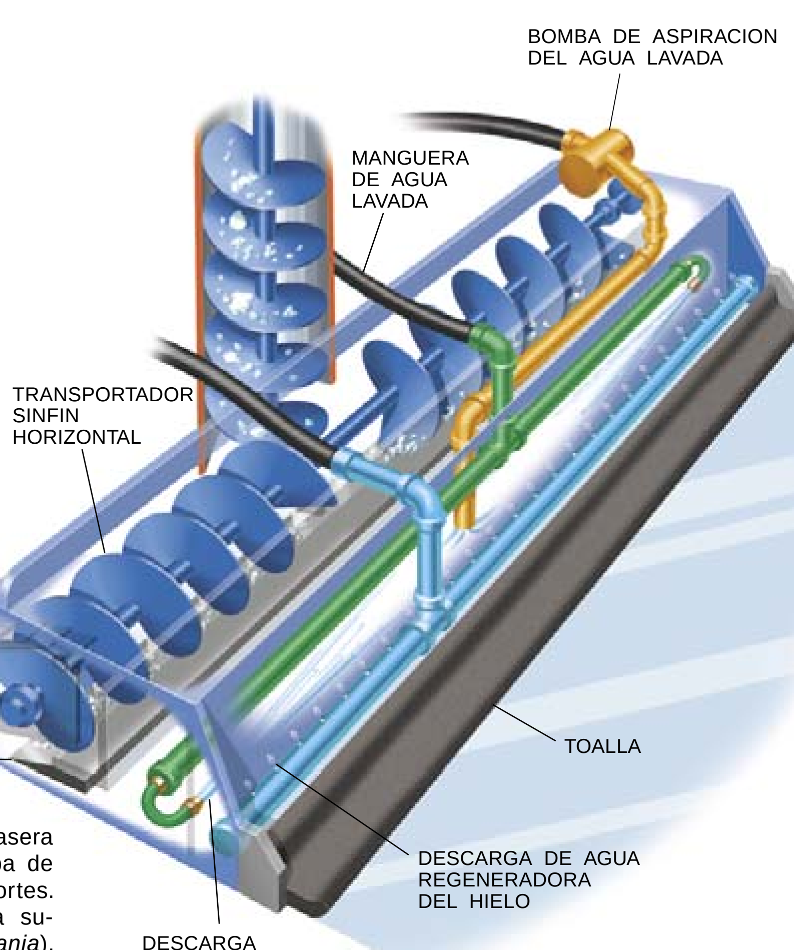
Hoy, pese a su competidor canadiense y a sus cinco competidores europeos, Frank J. Zamboni & Co. se ha convertido en sinónimo de reacondicionamiento del hielo y es con mucho el mayor de los fabricantes de máquinas reacondicionadoras de pistas. En funcionamiento hay del orden de 6000 de nuestras máquinas, al menos dos tercios del total mundial. Nuestra línea actual comprende siete modelos que van desde las pequeñas unidades, de unos 7000 dólares, arrastradas por un tractor, hasta un modelo refinadísimo movido por baterías que cuesta unos 80.000 dólares.



LAS PRIMERAS ZAMBONIS, como ésta de 1950, se construyeron sobre jeeps recuperados o sobre chasis de jeeps.



LA ACONDICIONADORA ZAMBONI dispone de un gran acumulador en su parte delantera donde recoge las virutas de hielo recortadas por una cuchilla instalada detrás de las ruedas traseras de la máquina. En los depósitos situados bajo el acumulador y delante del conductor se almacena agua para reacondicionar y limpiar el hielo.



EL ACONDICIONADOR propiamente dicho, montado en la trasera de la máquina, posee una cuchilla que rasura una fina capa de hielo a la vez que transportadores sinfín retiran los recortes. Mientras, chorros de agua limpian el hielo arrastrando la suciedad y los residuos hacia una manguera de vacío (*naranja*). Esa agua sucia se recupera filtrándola. Por último, una toalla extiende el agua regeneradora del hielo, agua que es rociada desde los orificios de un tubo de descarga (*azul claro*) a 82 grados centígrados.